

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA ELÉTRICA
FELIPE WILLIAM DA SILVA

ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM UMA EMPRESA
METALÚRGICA: um estudo de caso

Varginha

2017

FELIPE WILLIAM DA SILVA

**ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM UMA EMPRESA
METALÚRGICA: um estudo de caso**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, sob orientação do Prof. Me. Eduardo Henrique Ferroni.

Varginha

2017

FELIPE WILLIAM DA SILVA

**ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM UMA EMPRESA
METALÚRGICA: um estudo de caso**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: 04 / 12 / 2017

Prof. Me. Eduardo Henrique Ferroni

Prof. Me. Josué Alexandre Aquino

Prof. Me. Hélciner Vitor Ferreira

OBS:

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, aos amigos, familiares e minha namorada que sempre me apoiaram dentro e fora da faculdade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao orientador Prof. Me. Eduardo Henrique Ferroni, a Profa. Me. Luciene Oliveira Prósperi e ao colega de curso Rafael Kerner, que me ajudaram na construção deste trabalho.

“As cinco essenciais habilidades empreendedoras para o sucesso são: concentração, discernimento, organização, inovação e comunicação.”

Michael Faraday

RESUMO

Problemas relacionados a distúrbios na energia elétrica em indústrias, podem ter consequências como: atrasos na produção, aumento no custo da energia e danos irreversíveis na rede. O trabalho tem como objetivo, comprovar a importância da qualidade de energia elétrica nas indústrias, explicar os fenômenos que a afetam e por fim, realizar uma análise de conformidade, da qualidade da energia elétrica na empresa metalúrgica, na cidade de Lambari-MG. Foi utilizado um analisador de qualidade de energia Schneider, modelo ION 7650, por um período de 7 dias, conectado à rede da empresa, onde coletou 1008 leituras válidas, obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos a fim de obter as medições do fator de potência, distorções harmônicas na tensão e afundamentos de tensão, para análise de conformidade com os valores de referências definidos no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Para solução dos problemas, foi proposto, a instalação de uma unidade capacitiva, ligado em paralelo com a máquina de solda e troca dos condutores de alimentação.

Palavras-chave: Qualidade. Energia. Elétrica. Análise.

ABSTRACT

Problems related with disturbances at the electrical energy on industries that can result in consequences like: production delays, increase of the electrical bill and also irreversible damage at the network. The objective of this work is to prove the importance of the electrical energy quality at the industries, explain the phenomena that affect it and also perform a conformity analysis of the quality of the electrical energy at a metallurgical company, located in Lambari-MG. For this analysis it will be used the Schneider Energy quality analyzer, model ION 7650, for a total period of 7 days, connected to the company's electrical network to collect 1008 valid scans in consecutive intervals of 10 minutes, in order to gather measurements of the power factor, harmonic distortions at the tension and voltage sags, to be used for conformity analysis with the reference values defined at module 8 of Electric Energy Distribution Processes at the National Electric System (PRODIST). To solve these problems, it was proposed the installation of a capacitive unity, connected in parallel with the welding machine and also the exchange of the power conductors.

Key words: *Quality. Energy. Electrical. Analysis.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas básicas para avaliação da qualidade de energia	16
Figura 2 - Matriz energética brasileira	17
Figura 3 - Histórico de DEC e FEC no Brasil	22
Figura 4 - Triângulo de potência	24
Figura 5 - Tensão x corrente no resistor	25
Figura 6 - Tensão x corrente no indutor	25
Figura 7 - Tensão x corrente no capacitor	25
Figura 8 - Variação das perdas função do baixo fator de potência.....	28
Figura 9 - Transitório impulsivo.....	30
Figura 10 - Indução eletromagnética	30
Figura 11- Transitório oscilatório.....	31
Figura 12 - Afundamento de tensão	32
Figura 13 - Elevação de tensão.....	33
Figura 14 - Interrupção momentânea devido a um curto-circuito e subsequente religamento.	34
Figura 15 - Sobretensão.....	36
Figura 16 - Subtensão	37
Figura 17 - Desequilíbrio de tensão.....	38
Figura 18 - Distorção harmônica	42
Figura 19 - Recorte	44
Figura 20- Ruído em onda senoidal.....	44
Figura 21 - Flutuação de tensão.....	45
Figura 22 - Analisador de qualidade de energia ION 7650.....	47
Figura 23 – Diagrama de blocos da empresa.....	48
Figura 24 - Máquina de solda	48
Figura 25 - Dados de tensão, corrente, fator de potência e potencias	54
Figura 26- Valores comerciais de unidades capacitivas.....	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Amostra de tensão.....	51
Gráfico 2 - Amostra de corrente.....	51
Gráfico 3 - Diagrama fasorial das tensões.....	52
Gráfico 4 - Histórico do fator de potência.....	52
Gráfico 5 - Fatores de potência médio	53
Gráfico 6 - Harmônicos na tensão	58
Gráfico 7 - Ordem dos harmônicos na tensão	58
Gráfico 8 - Harmônicos na forma de onda	59
Gráfico 9 - Afundamento de tensão.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Bandeiras tarifárias.....	18
Tabela 2 - Categorias e Características Típicas de Fenômenos Eletromagnéticos.....	28
Tabela 3 - Ordem, frequência e sequência das harmônicas.....	40
Tabela 4 - Harmônicos totais por ordem de grandeza.	42
Tabela 5 - Níveis de tensão.....	50
Tabela 6 - Dados da máquina de solda	60
Tabela 7 - Capacidade de corrente por cabo.....	60

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Fator de carga	19
Equação 2 - Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora	21
Equação 3 - Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora	21
Equação 4 - Potência aparente.....	24
Equação 5 - Potência ativa.....	24
Equação 6 - Reatância indutiva	26
Equação 7 - Reatância capacitiva	26
Equação 8 - Capacitância	26
Equação 9 - Indutância	26
Equação 10 - Fator de desequilíbrio 1	38
Equação 11 - Fator de desequilíbrio 2	39
Equação 12 - Variável β	39
Equação 13 - Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	40
Equação 14 - Distorção harmônica total de tensão	40
Equação 15 - Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	41
Equação 16 - Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	41
Equação 17 - Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3.....	41
Equação 18 - Severidade de flutuação de tensão de curta duração	45
Equação 19 - Severidade de flutuação de tensão de longa duração	45
Equação 20 - Potência reativa capacitiva	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	CONTEXTO GERAL.....	16
2.1	Cenário energético do Brasil	17
2.2	Eficiência energética	19
2.3	Fiscalização.....	20
3	FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS.....	23
3.1	Fator de potência	23
3.2	Distúrbios da energia elétrica.....	28
3.2.1	Transitórios ou transientes	29
3.2.1.1	Transitório impulsivo.....	29
3.2.1.2	Transitório oscilatório.....	31
3.2.2	Variações de tensão de curta duração	31
3.2.2.1	Afundamento de tensão	32
3.2.2.2	Elevação de tensão.....	33
3.2.2.3	Interrupção de curta duração	33
3.2.2.3.1	Interrupção momentânea	34
3.2.2.3.2	Interrupção temporária	34
3.2.3	Variações de tensão de longa duração	35
3.2.3.1	Sobretensões	35
3.2.3.2	Subtensões	36
3.2.3.3	Interrupções sustentadas	37
3.2.4	Desequilíbrio de tensão	37
3.2.5	Distorção na forma de onda	39
3.2.5.1	DC <i>offset</i>	39
3.2.5.2	Harmônicos	39
3.2.5.3	Inter-harmônicos.....	43
3.2.5.4	Recorte (<i>Notching</i>).....	43
3.2.5.5	Ruído (<i>Noise</i>).....	44
3.2.6	Flutuação de tensão	45
3.2.7	Variações na frequência	46
4	METODOLOGIA E MEDIÇÃO.....	47
4.1	Parâmetros para análise	49
5	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES	50
5.1	Tensão e corrente.....	50
5.2	Fator de potência	52
5.2.1	Possível solução para o baixo fator de potência.....	53
5.3	Distorção harmônica	57
5.4	Afundamento de Tensão	59
5.4.1	Possível solução para os afundamentos de tensão	60
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

O termo qualidade da energia inclui uma gama de fenômenos, abrangendo áreas de interesse de sistemas da energia elétrica até problemas relacionados com a comunicação em redes de transmissão de dados. Dessa forma, devem ser divulgados e reconhecidos por todos os setores envolvidos com o consumo, transmissão e geração de energia elétrica.

Não apenas a concessionária é responsável pela qualidade da energia, também o consumidor pode poluir o sistema elétrico com a injeção de harmônicos de corrente. Cargas não lineares, como conversores de frequência para acionamento de motores, computadores, entre outras cargas, geram correntes distorcidas que podem promover a distorção da forma de onda da tensão, espalhando o problema da qualidade para toda a instalação (ROCHA, 2016). A Resolução, ANEEL 414/2010, tem como objetivo regular as disposições a serem observadas pelos consumidores e pelas empresas responsáveis a prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica, estabelecendo os seus direitos e deveres.

A interpretação destes fenômenos, principalmente as distorções de tensões e correntes, localizadas tanto nos PAC's (Ponto de Acoplamento Comum) como também dentro das instalações dos próprios consumidores de energia, está associada diretamente com a racionalização da energia, aumento da produtividade e a correção do baixo fator de potência que caracteriza uma má qualidade da energia nas instalações, pois a circulação de uma potência reativa causa perdas por efeito Joule nos condutores e transformadores.

A potência reativa ocupa espaço da seção do condutor reduzindo a capacidade de transferir potência ativa. A ocorrência destes problemas determina a necessidade de uma busca mútua de soluções, entre ambas as partes, para a realização de medidas práticas e econômicas (PAULILO, 2013).

Segundo Martinho (2012), no Brasil, as indústrias, vem aumentando sua preocupação com a qualidade da energia, que por sua vez gera, atrasos na produção, aumento na conta de energia e danos irreversíveis a rede. Hoje, grande parte das empresas já possui estudos sobre índices de paradas por afundamento, tem um determinado tipo de condicionador de energia, preocupa-se com o fator de potência, e em alguns casos já estão tratando as harmônicas. Mais ainda é pequena a preocupação, em comparação com a necessidade e principalmente com a perda que existe.

De acordo com Dugan (2002) há quatro principais razões para que os consumidores e empresas de energia elétrica se preocupem com a qualidade de energia, são eles:

a) Os equipamentos atuais são mais sensíveis às variações na qualidade da energia, eles

- possuem controles baseados em microprocessadores e dispositivos eletrônicos;
- b) A crescente eficiência geral do sistema que resultou no crescimento da utilização de dispositivos que controla a velocidade de motores e capacitores para a correção do fator de potência. Isso resulta em aumento dos níveis harmônicos no sistema;
 - c) Maior conscientização dos consumidores em relação aos fenômenos ligados à qualidade da energia, que estão se tornando mais informados a respeito de fenômenos como interrupções, sobtensões, transitórios de chaveamentos, passando a exigir que as concessionárias melhorem a qualidade da energia fornecida;
 - d) Aumento de cargas na rede, significando que a falha de qualquer componente tem consequências muito mais importantes para o sistema elétrico.

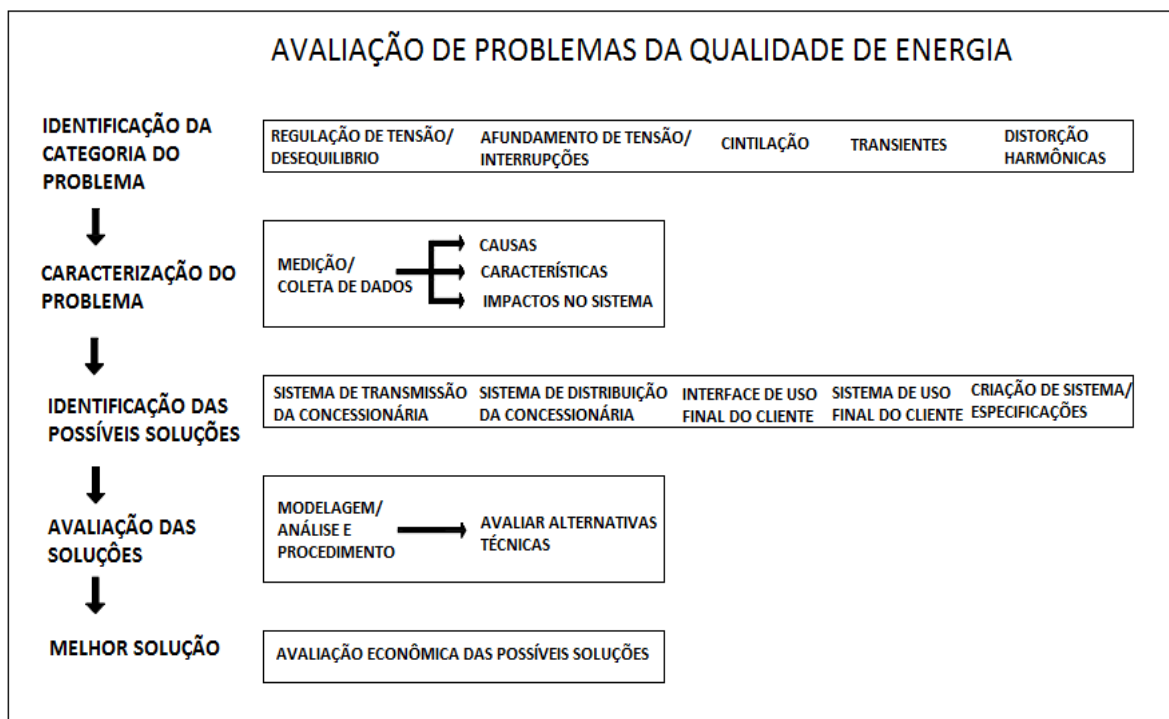
A qualidade de energia é a compatibilidade entre a fonte de energia e o equipamento elétrico ligado a essa energia fornecida, ou seja, é a forma que a eletricidade encontra de atender as necessidades de quem a utiliza (MARTINHO, 2012).

O objetivo geral deste trabalho é analisar a conformidade da qualidade da energia elétrica na indústria metalúrgica, na cidade de Iambari-MG, através de medições do fator de potência, distorções harmônicas na tensão e afundamento, com o analisador de energia da marca Schneider modelo ION 7650 e comparado com os valores de referência definidos no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, referência nacional em relação à qualidade de energia elétrica.

2 CONTEXTO GERAL

Problemas com a qualidade de energia abrange um grande número de fenômenos. Tais fenômenos possuem diferentes causas e soluções que podem ser usadas para melhorar a qualidade de energia e o desempenho do sistema. No entanto, é útil observar as etapas gerais que estão associadas à avaliação de muitos desses problemas, especialmente se as etapas podem envolver interação entre o sistema de fornecimento de energia elétrica e a instalação do cliente (DUGAN, 2002). A Figura 1 apresenta as etapas básicas para avaliação da qualidade de energia.

Figura 1 – Etapas básicas para avaliação da qualidade de energia.



Fonte: Adaptado de Dugan, (2002).

Pode-se adotar como critério para avaliar a qualidade da energia elétrica o afastamento que o sistema real experimenta dessas condições ideais. Essa abordagem permite estabelecer índices que avaliam a deterioração das condições de operação, em função dos distúrbios que são impostos ao sistema.

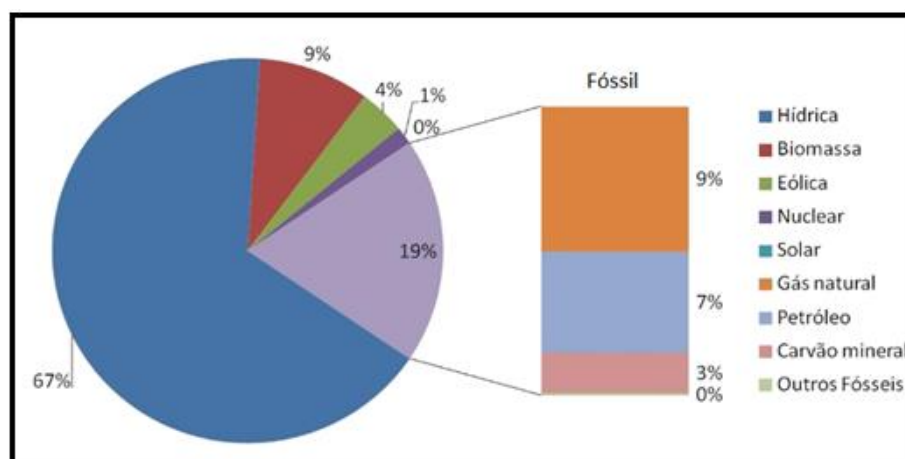
Segundo Martinho (2012), diversas nomenclaturas são usadas para definir os vários problemas relacionados a falta da qualidade de energia: *sag*, *swell*, *surge*, *flicker* em inglês e em português: afundamento e elevação de tensão, surto, ruído, interrupções, harmônicas, entre outros. Todos esses termos expressam algum distúrbio da qualidade da energia elétrica.

2.1 Cenário energético do Brasil

O Brasil, comparado a outros países, apresenta uma condição energética singular e que evoluiu de forma distinta. Do lado dos combustíveis líquidos, nosso país passou de importador de volumes significativos de petróleo para um quadro de autossuficiência e crescente exportador, explorando suas importantes reservas, o que não justifica o desperdício dos combustíveis.

Quanto à eletricidade, o desenvolvimento de nosso enorme potencial de hidroelétrico impõe custos elevados e apresenta restrições ambientais, ocasionando, às vezes, crises setoriais. Assim, o setor energético brasileiro vivenciou nestas últimas décadas diferentes períodos de carência de setores energéticos e acumulou razoável experiência na gestão das demandas como ferramenta auxiliar para o equilíbrio do mercado, com interessante acervo de resultados. A Figura 2, apresenta a matriz energética brasileira (ELETRICIDADE E SERVIÇOS S.A., 2012).

Figura 2 – Matriz energética brasileira.



Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2015).

Em 2014, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) criou as bandeiras tarifárias verde, amarela e vermelha, que funcionam como um semáforo de trânsito e se refleti em diferença de tarifa para o consumidor. A bandeira verde significa custos mais baixos para a compra de energia. A bandeira amarela indica um sinal de atenção, pois os custos de compra de energia estão aumentando. Por sua vez, a bandeira vermelha indica que a situação anterior está se agravando e a oferta de energia para atender a demanda dos consumidores ocorre com maiores custos de compra, como por exemplo, o acionamento de grande quantidade de termelétricas para gerar energia, que é uma fonte mais cara do que as usinas hidrelétricas. O

acionamento das termelétricas acontece normalmente quando chove pouco e os reservatórios de água das usinas hidrelétricas fica com baixo armazenamento (ELETRICIDADE E SERVIÇOS S.A., 2012). A Tabela 1, apresenta um resumo das bandeiras tarifárias atualizadas, conforme novos valores, estabelecidos pela ANEEL, no dia 24/10/17.

Tabela 1 – Bandeiras tarifárias.

Cobrança extra (R\$) a cada 100 Kwh consumidos	Custo de energia térmica (R\$ / MWh)			
	Até 211,28	Entre 211,28 – 422,56	Entre 422,56 – 610,00	Acima de 610,00
.....	VERDE	.....	.....	.....
1,00	.....	AMARELA	.....	.....
3,00	.....	.....	VERMELHA 1	.....
5,00	.....	.....	.....	VERMELHA 2

Fonte: Adaptado de AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2017).

No Brasil temos um órgão responsável pela gestão da energia elétrica, chamado Operador nacional do Sistema elétrico (ONS), o mesmo é responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no sistema interligado nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da ANEEL. Para o exercício de suas atribuições legais e o cumprimento de sua missão institucional, o ONS desenvolve uma série de estudos e ações a serem exercidas sobre o sistema e seus agentes para manejar o estoque de energia de forma a garantir a segurança do suprimento contínuo em todo país. O operador nacional foi formado por membros associados e membros participantes, constituídos por empresas de geração, transmissão, distribuição e consumidores livres de grande porte. Também participam importadores e exportadores de energia, além do Ministério de Minas e Energia (MME) (CAPELLI, 2013).

O sistema interligado nacional (SIN), foi originado a fim de garantir o abastecimento ininterrupto de energia dentro do país, cuja função é criar uma matriz na qual uma usina pode suprir a deficiência de outra, seja por problemas técnicos ou pelo fato do Brasil ser um país continental, onde por diversos períodos do ano os reservatórios das usinas hidrelétricas tendem a diminuição de seus níveis.

Com tamanho e características que permitem considerá-lo único âmbito mundial, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O SIN é

formado pelas empresas das regiões sul, sudeste, centro-oeste, nordeste e parte da região norte. Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica (CAPELLI, 2013).

2.2 Eficiência energética

Segundo a Associação Brasileira das Empresas de Serviço de Conservação de Energia-ABESCO (2015), a utilização racional de energia chamada também simplesmente de eficiência energética, consiste em usar de modo eficiente a energia para se obter um determinado resultado. Por definição, a eficiência energética consiste da relação entre a quantidade de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada para sua realização.

Se os equipamentos eletrônicos de potência que estão cada vez mais presentes no mercado oferecem alto desempenho, rapidez de processamento com menor consumo de energia, também podem ser os vilões da geração de distúrbios. Por isso é necessário intensificar o monitoramento da qualidade da energia.

Conforme Capelli (2013), para elaborar projetos a fim de maximizar a eficiência energética, é preciso conhecer muito bem alguns conceitos fundamentais, entre eles consumo, demanda, intervalo de integração e fator de carga.

- a) Consumo: é a energia gasta durante o tempo utilizado. Sua equação fundamental é consumo = potência x tempo. É por essa mesma razão que sua unidade de medida é o Wh [watt.hora] os seus múltiplos kWh, MWh;
- b) Demanda: é a medida das potências instantâneas solicitadas a concessionária de energia pelo consumidor e integradas em determinado intervalo de tempo, que se chama período de integração, e no Brasil é igual a 15 minutos. Ele varia em relação a outros países entre cinco e 30 minutos. O conceito de demanda, portanto, só tem sentido quando relacionado ao término desse intervalo de tempo;
- c) Fator de carga (FC): trata-se de um índice que permite verificar a quantidade de energia elétrica que se utiliza de forma racional. Assim como o fator de potência, o de carga varia entre 0 e 1. É expresso pela Equação 1.

$$F_c = \frac{\text{consumo}[KWh]}{\text{demanda}[KW] \times 730 \text{ horas}} \quad (1)$$

O valor de 730h no denominador muda de acordo com a classe do consumidor, mas

representa o número de horas médio em um mês genérico do ano. Quanto mais próximo de um, melhor é a eficiência energética do sistema.

Um projeto de eficiência energética define ações em determinada operação, visando primordialmente a redução de custos com consumo de insumos energéticos e hídricos, apresentando sugestões de viabilidade técnico-econômica de implantação, incluindo as especificações técnicas, o “*project finance*”, equipamentos, materiais, serviços e as implantações propriamente ditas, além do gerenciamento do projeto e a gestão dos resultados após o término das intervenções (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇO DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA, 2015).

2.3 Fiscalização

Com o objetivo de proporcionar condições favoráveis para que o mercado de energia elétrica se desenvolva em equilíbrio entre os agentes e a sociedade, em 1997 foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica. A ANEEL, autarquia em regime especial vinculada ao Ministério de Minas e Energia, foi criada para regular o setor elétrico brasileiro, por meio da Lei nº 9.427/1996 e do Decreto nº 2.335/1997 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2007).

Principais atribuições:

- a) Regular a geração (produção), transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica;
- b) Fiscalizar, diretamente ou mediante convênios com órgãos estaduais, as concessões, as permissões e os serviços de energia elétrica;
- c) Implementar as políticas e diretrizes do governo federal relativas e exploração da energia elétrica e ao aproveitamento dos potenciais hidráulicos;
- d) Estabelecer tarifas;
- e) Diminuir as divergências, na esfera administrativa, entre os agentes e os consumidores;
- f) Promover as atividades de outorgas de concessão, permissão e autorização de empreendimentos e serviços de energia elétrica, por delegação do governo federal.

Dentro dos aspectos de fiscalização a ANEEL realiza auditoria nas concessionárias bem como monitora o desempenho das distribuidoras quanto à continuidade do serviço prestado de energia com base em indicadores coletivos e individuais. O assunto está regulamentado no Módulo 8 - Qualidade Energia Elétrica dos Procedimentos de Distribuição-PRODIST, aprovado pela ANEEL através da Resolução Normativa nº 345/2008, que já passou por 8

revisões com vigência da última versão em 01/01/2017 é a referência nacional em termos de qualidade de energia.

O desempenho das concessionárias quanto à continuidade do serviço prestado de energia elétrica é medido pela ANEEL com base em indicadores específicos, denominados de DEC e FEC (MEHL, 2004).

- a) DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) indica o número de horas em média que um consumidor fica sem energia elétrica durante um período, geralmente mensal;
- b) FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) indica quantas vezes, em média, houve interrupção na unidade consumidora (residência, comércio, indústria etc.).

O DEC e o FEC são calculados pelas Equações 2 e 3, respectivamente:

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^n ca(i) \times T(i)}{Cs} \quad (2)$$

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^n ca(i)}{Cs} \quad (3)$$

Onde:

i= número de interrupções, de 1 a n

T(i)=tempo de duração de cada interrupção do conjunto de consumidores considerados, em horas

ca(i)= número de consumidores do conjunto considerado, atingido nas interrupções

Cs= número total de consumidores do conjunto considerado.

As metas de DEC e FEC a serem observadas pelas concessionárias estão definidas em Resolução específica da ANEEL. Essas metas também estão sendo publicadas mensalmente na conta de energia elétrica do consumidor. A ANEEL implantou no ano 2000 mais três indicadores destinados a aferir a qualidade prestada diretamente ao consumidor (MEHL, 2004).

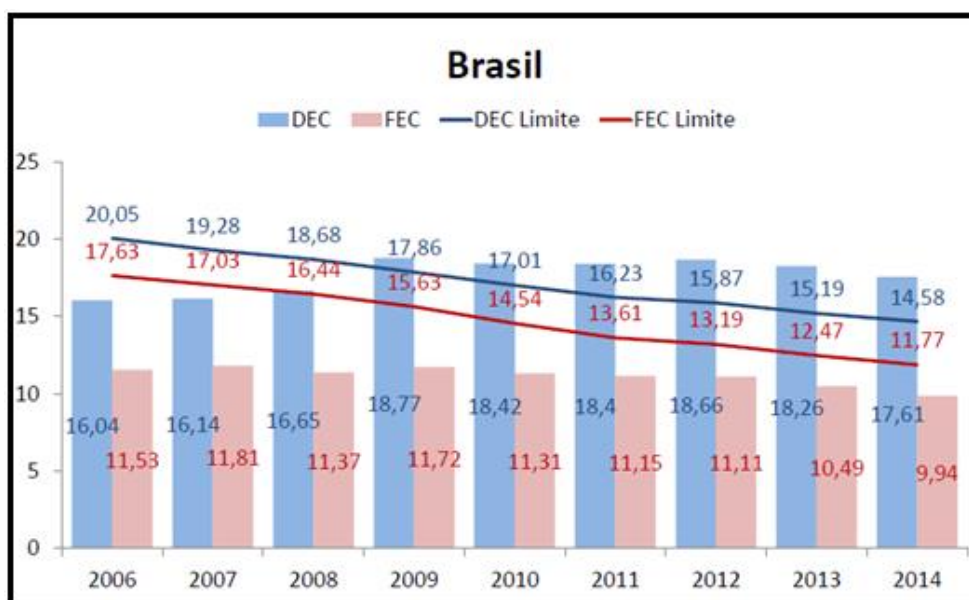
São eles:

- a) DIC (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora);
- b) FIC (Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora);
- c) DMIC (Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora).

Os indicadores DIC e FIC indicam por quanto tempo e o número de vezes respectivamente que uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica durante um período considerado. O DMIC é um indicador que limita o tempo máximo de cada interrupção, impedindo que a concessionária deixe o consumidor sem energia elétrica durante um período muito longo. Esse indicador passa a ser controlado a partir de 2003. As metas para os indicadores DIC, FIC e DMIC estão publicadas na Resolução ANEEL número 024, de 27 de janeiro de 2000 e já estão sendo informadas na conta de energia elétrica do consumidor as metas do DIC e FIC (MEHL, 2004).

A Figura 3 apresenta o histórico de DEC e FEC no Brasil até o ano de 2014.

Figura 3 – Histórico de DEC e FEC no Brasil.



Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2015).

3 FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS

Para-se fazer a análise da qualidade de energia é necessário a caracterização dos fenômenos eletromagnéticos que a afetam. Estes fenômenos, podem ter origem na energia elétrica entregue pela concessionária, ou gerados por equipamentos instalados na rede interna do consumidor.

3.1 Fator de potência

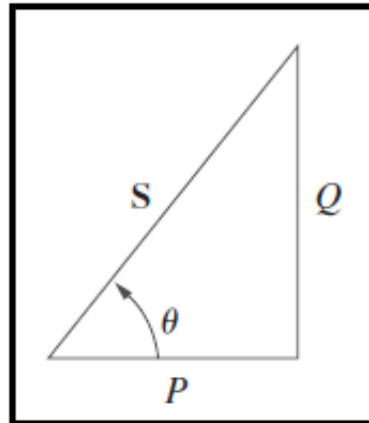
De acordo com Cotrim (2003), O fator de potência nas instalações residenciais e institucionais é, via de regra, bem próximo da unidade, devido ao predomínio das cargas resistivas. Nas instalações elétricas industriais, no entanto, onde predominam cargas indutivas, o fator de potência assume, por vezes, valores bem inferiores.

Um baixo fator de potência em uma instalação significa baixa utilização em todo sistema de alimentação, desde a rede da companhia concessionária até a parte interna da instalação, incluindo os equipamentos em uso. Tanto é assim que, uma vez constatado um fator de potência de valor inferior a um valor mínimo prefixado a empresa é sobretaxada. Isso representa, para quem não está com suas instalações adequadas, substancial despesa extra, além de maiores perdas, queda de tensão, menos rendimento e maior desgaste nas máquinas e equipamentos em geral.

No Brasil, a ANEEL estabelece que o fator de potência nas unidades consumidoras deve ser superior a 0,92 capacitivo durante 6 horas da madrugada e 0,92 indutivo durante as outras 18 horas do dia.

Um dos métodos mais conhecidos, para determinar o fator de potência é através da análise de um triângulo de potência, ilustrado pela Figura 4. O triângulo de potência possui quatro parâmetros: potência aparente; potência ativa; potência reativa, e ângulo do fator de potência. Dados dois desses parâmetros, os outros dois podem ser obtidos a partir do teorema de Pitágoras e trigonometria (SADIKU, 2013).

Figura 4 - Triângulo de potência.



Fonte: Sadiku, (2013).

Onde:

S = potência aparente (VA);

P = potência ativa (W);

Q = potência reativa (VAr);

θ = o ângulo de defasagem entre as potências aparente e ativa.

Aplicando o teorema de Pitágoras tem-se a Equação 4.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4)$$

E pela trigonometria tem-se a Equação 5.

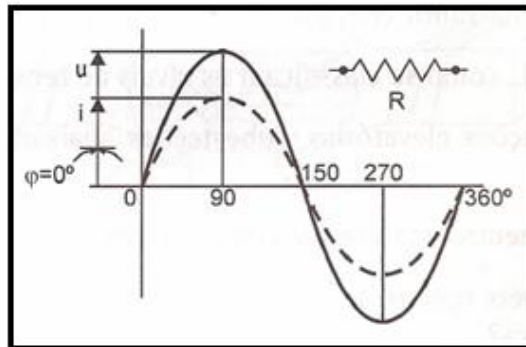
$$P = S \cdot \cos\theta \quad (5)$$

Onde:

$\cos\theta$ = Fator de potência.

Para entender o que é fator de potência, é preciso compreender carga linear e não linear. Uma carga linear é aquela que obedece a lei de OHM, ou seja, $U=I.R$ (tensão é igual ao produto da corrente pela resistência). O resistor é um exemplo de carga linear (CAPELLI, 2013). Na Figura 5 a corrente está em fase com a tensão, isso significa que se aumentarmos a tensão aplicada no resistor, a corrente aumenta na mesma proporção, linearmente.

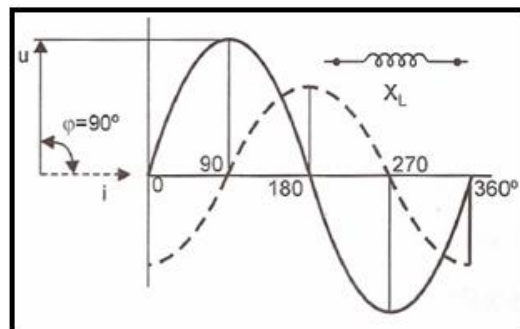
Figura 5 - Tensão x corrente no resistor.



Fonte: Capelli, (2013).

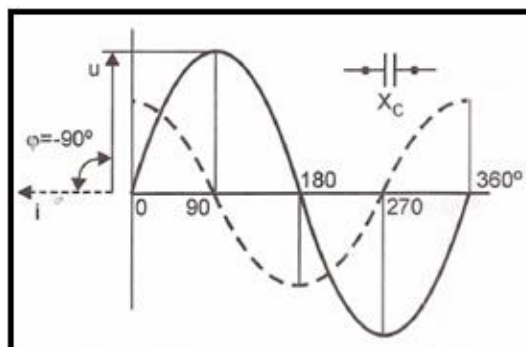
O mesmo não ocorre em indutores e capacitores. A tensão em um circuito puramente indutivo está adiantada 90° e um circuito capacitivo atrasada 90° , ambas em relação a corrente. As Figuras 6 e 7 apresenta, respectivamente, a relação tensão x corrente no indutor e tensão x corrente no capacitor (CAPELLI, 2013).

Figura 6 - Tensão x corrente no indutor.



Fonte: Capelli, (2013).

Figura 7 - Tensão x corrente no capacitor.



Fonte: Capelli, (2013).

As Equações 6 e 7 representam o cálculo para as reatâncias indutivas e capacitivas

respectivamente.

$$X_L = 2\pi fL \quad (6)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (7)$$

Onde:

X_L = reatância indutiva (Ω);

L = indutância (H);

f = frequência da fonte (Hz);

X_C = reatância capacitiva (Ω);

C = Capacitância (F).

A equação para determinar o valor da capacitância de um banco de capacitor, através da potência reativa é definida pela Equação 8:

$$C = \frac{Q_c}{\omega V_{RMS}^2} = \frac{P(\text{tg}\theta_1 - \text{tg}\theta_2)}{\omega V_{RMS}^2} \quad (8)$$

Onde:

C = Capacitância (F);

Q_c = Potência Reativa (VAr);

ω = Frequência (rad/s);

P = Potência Ativa (W);

V_{rms} = Tensão em RMS (V).

Embora a situação mais comum na prática seja de uma carga indutiva, também é possível que a carga seja capacitiva; isto é, a carga está operando com um fator de potência adiantado. Nesse caso, um indutor deveria ser ligado na carga para correção do fator de potência. A indutância (L) necessária pode ser calculada a partir da Equação 9 (SADIKU, 2013):

$$L = \frac{V_{RMS}^2}{\omega Q_L} \quad (9)$$

Onde:

Q_L = potência reativa (VAr);

ω = frequência (rad/s);

L = indutância (H);

V_{rms} = tensão RMS (V).

Conforme Cotrim (2003), baixo fator de potência pode advir de diversas causas, sendo as principais citadas a seguir:

- a) Motores de indução operando em vazio ou sobrecarga: tais motores consomem praticamente a mesma energia reativa, quer operando a vazio, quer operando a plena carga. A energia ativa, entretanto, é diretamente proporcional a carga mecânica aplicada ao eixo do motor. Nessas condições, quanto menor a carga, menor a energia ativa consumida e menor o fator de potência;
- b) Transformadores operando a vazio ou com pequenas cargas: analogicamente aos motores, os transformadores, quando superdimensionados para a carga que deveriam alimentar, consomem uma certa quantidade de energia reativa relativamente grande se comparada a energia ativa, dando origem a um fator de potência baixo;
- c) Lâmpadas de descarga: as lâmpadas de descarga (vapor mercúrio, vapor sódio, fluorescentes, etc.), para funcionarem, necessitam de auxílio de um reator. Os reatores, como os motores e os transformadores, possuem bobinas que consomem energia reativa, contribuindo para redução do fator de potência. O uso de reatores compensador (com alto $\cos\phi$) pode contornar, em parte, o problema;
- d) Tensão acima da nominal: a potência reativa é, aproximadamente, proporcional ao quadrado da tensão aplicada, enquanto que, no caso dos motores de indução, a potência ativa praticamente só depende da carga mecânica aplicada ao eixo do motor. Assim, quanto maior a tensão aplicada aos motores, maior a energia reativa consumida e menor o fator de potência.

De acordo com o Comitê de Distribuição de Energia Elétrica CODI (2004), os problemas clássicos associados a um baixo fator de potência são:

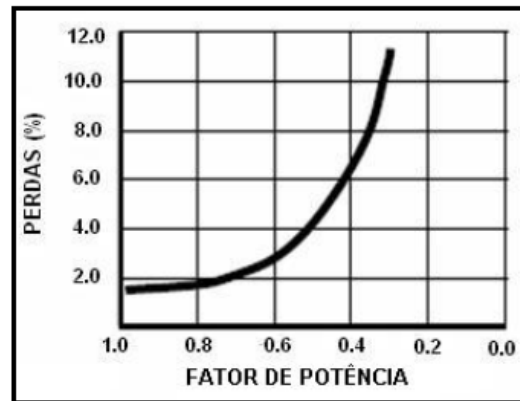
- a) Favorecimento à ocorrência de sobrecargas na rede elétrica;
- b) Aumento das perdas de energia em condutores, em decorrência da circulação de maiores parcelas de correntes de natureza reativa;
- c) Redução dos níveis de tensão, principalmente em pontos mais distantes da origem da alimentação elétrica, devido às quedas de tensão originadas nos circuitos pela circulação de

maiores níveis de corrente;

- d) Comprometimento de parcela da capacidade dos transformadores e alimentadores apenas para suprimento da energia reativa (subutilização do sistema elétrico).

A Figura 8, apresenta as perdas em função do baixo fator de potência.

Figura 8 - Variação das perdas em função do baixo fator de potência.



Fonte: COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (2004).

3.2 Distúrbios da energia elétrica

A Tabela 2, representa as características dos principais distúrbios da energia elétrica, que se encontram divididos em categorias, de acordo com o espectro, duração e tensão típica,

Tabela 2 – Categorias e Características Típicas de Fenômenos Eletromagnéticos.

Categorias	Espectro típico	Duração típica	Tensão típica
1 Transitórios	.....	.....	.....
1.1 Impulsivos	.....	.....	.....
1.1.1 Nanossegundos	5ns ascensão	< 50ns	.....
1.1.2 Microssegundos	1µs ascensão	50ns – 1ms	.....
1.1.3 Milissegundos	0,1ms ascensão	> 1ms	.....
1.2 Oscilatórios	.....	.....	.....
1.2.1 Baixa Frequência	< 5 kHz	0,3 – 50ms	0 – 4 p.u.
1.2.2 Média Frequência	5 – 500 kHz	20µs	0 – 8 p.u.
1.2.3 Alta Frequência	0,5 – 5 MHz	5µs	0 – 4 p.u.
2 Var. de Tensão de Curta Duração	.....	.....	.....
2.1 Instantâneas	.....	.....	.....
2.1.1 Sag (Afundamento)	.....	0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 p.u.

Categorias	Espectro típico	Duração típica	Tensão típica
2.1.2 <i>Swell</i> (Elevação)	0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 p.u.
2.2 Momentâneas
2.2.1 Interrupção	0,5 ciclos – 3s	< 0,1 p.u.
2.2.2 <i>Sag</i> (Afundamento)	30 ciclos – 3s	0,1 – 0,9 p.u.
2.2.3 <i>Swell</i> (Elevação)	30 ciclos – 3s	1,1 – 1,4 p.u.
2.3 Temporárias
2.3.1 Interrupção	3s – 1 min	< 0,1 p.u.
2.3.2 <i>Sag</i> (Afundamento)	3s – 1 min	0,1 – 0,9 p.u.
2.3.3 <i>Swell</i> (Elevação)	3s – 1 min	1,1 – 1,2 p.u.
3 Var. de Tensão de Longa Duração
3.1 Interrupção Sustentada	> 1 min	0,0 p.u.
3.2 Subtensão	> 1 min	0,8 – 0,9 p.u.
3.3 Sobretensão	> 1 min	1,1 – 1,2 p.u.
4 Desequilíbrio de Tensão	Estacionário	0,5 – 2%
5 Distorção da Forma de Onda
5.1 <i>DC Offset</i>	Estacionário	0 – 0,1%
5.2 Harmônicos	Estacionário	0 – 20%
5.3 Inter-harmônicos	Estacionário	0 – 2%
5.4 <i>Notching</i> (Recorte de Tensão)	Estacionário	.....
5.5 Ruído	Estacionário	0– 1%
6.Flutuação de Tensão	Intermitente	0,1 – 7%
7.Variação de Frequência	< 10s	.....

Fonte: Adaptado de Dugan, (2002).

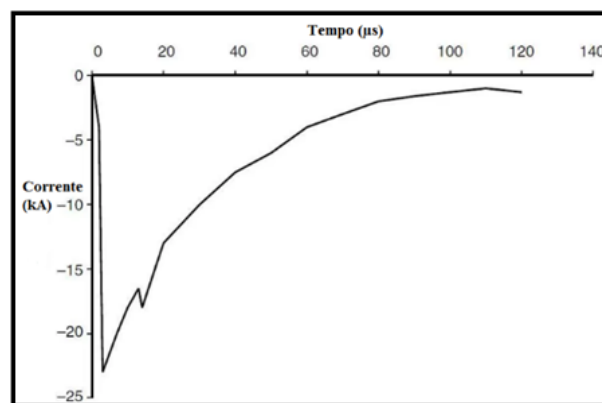
3.2.1 Transitórios ou transientes

Segundo Martinho (2012), os transitórios são fenômenos eletromagnéticos oriundos de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica. Geralmente, a duração de um transitório é muito pequena, mas de grande importância, uma vez que submetem equipamentos a grandes esforços de tensão e/ou corrente. Existem dois tipos de transitórios: os impulsivos, causados por descargas atmosféricas, e os oscilatórios, causados por chaveamentos de cargas.

3.2.1.1 Transitório impulsivo

Acontece pela incidência de uma ou mais descargas atmosféricas, que causam uma alteração indesejável no sistema em regime, apresentando reflexo na forma de onda. A alteração se dá de forma unidirecional (negativa ou positiva). As descargas atmosféricas que normalmente possuem frequências diferentes do sistema acabam induzindo uma alteração brusca no padrão da energia (MARTINHO, 2012). A Figura 9 apresenta um exemplo de transiente impulsivo que atinge seu valor máximo superior a 20 kA em torno de 1,2 μ s e, posteriormente, decai para menos da metade de seu valor máximo em até 50 μ s.

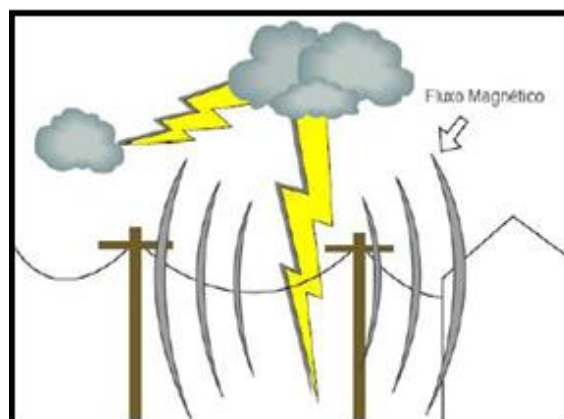
Figura 9 - Transitório impulsivo.



Fonte: Adaptado de Dugan, (2002).

Não há necessidade de uma queda direta de um raio na instalação elétrica para que este cause danos a equipamentos. Campos eletromagnéticos criados pela descarga atmosférica induzem transitórios impulsivos em instalações próximas (ROCHA, 2016). A Figura 10 mostra esquematicamente um relâmpago e um raio causando indução eletromagnética em um sistema de distribuição.

Figura 10 - Indução eletromagnética.



Fonte: Rocha, (2016).

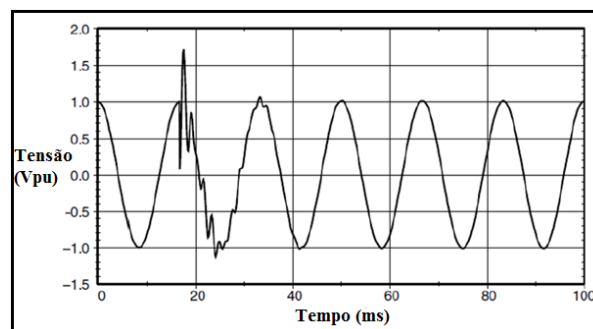
Para a proteção de equipamentos sensíveis devido a presença de descargas atmosféricas é necessário o uso de Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS). Estes dispositivos limitam a amplitude dos surtos aos níveis de resistibilidade dos equipamentos. Eles têm a capacidade de identificar a existência de um impulso e aterrar transitoriamente o sistema elétrico de forma a descarregar a energia do impulso para a terra (MARTINHO, 2012).

3.2.1.2 Transitório oscilatório

Um transitório é oscilatório quando ocorre uma mudança na condição de regime permanente no sinal de tensão e/ou corrente oscilando na frequência natural do sistema. São decorrentes da energização de linhas, abertura de corrente indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores (ROCHA, 2016).

A energização de banco de capacitores é a causa mais comum de transitório oscilatório em uma instalação industrial e se acontecer com valores inferiores a 5kHz e períodos entre 0,3 e 50ms, chama-se transitório oscilatório de baixa frequência, que é encontrado nos sistemas de distribuição das concessionárias (MARTINHO, 2012). A Figura 11 apresenta um oscilograma de uma perturbação oriunda de energização de banco de capacitores.

Figura 11 - Transitório oscilatório.



Fonte: Adaptado de Dugan, (2002).

Contatores para conexão de capacitores com resistores de pré-carga evitam corrente de partida excessiva. Outra solução para a conexão suave de banco de capacitores é o uso de tiristores. O artifício que se utiliza é a conexão e o desligamento dos capacitores quando suas correntes passam por zero. Esta operação é conhecida como “zero crossing” e isenta a rede dos transitórios ocasionados na manobra dos capacitores.

3.2.2 Variação de tensão de curta duração

De acordo com Martinho (2012), as variações de tensão de curta duração podem ser caracterizadas por alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias. Tais variações de tensão são, geralmente, causadas pela energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida, ou por intermitentes falhas nas conexões dos cabos de sistema. Dependendo do local da falha e das condições do sistema, o resultado pode ser um afundamento momentâneo de tensão *sag*, uma elevação momentânea de tensão *swell*, ou mesmo uma interrupção completa do sistema elétrico.

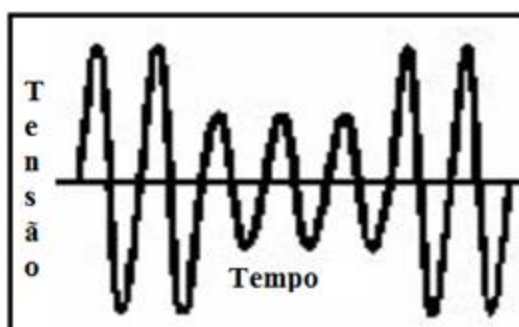
3.2.2.1 Afundamento de tensão

Define-se como uma redução no valor eficaz da tensão, entre 0,1 e 0,9 pu, na frequência fundamental, com duração entre 0,5 ciclo e um minuto (DUGAN, 2002).

Os afundamentos de tensão “*sag*” podem ser causados por faltas no sistema elétrico da concessionária, partida de grandes motores ou a corrente de “*inrush*” de transformadores. A razão mais comum é o curto-circuito em redes de distribuição. Nesse caso, a tensão do barramento em que o circuito submetido ao curto está conectado é afundada, devido ao elevado valor da corrente de curto. Assim os demais alimentadores, conectados ao mesmo barramento, ficam submetidos a essa tensão afundada (ROCHA, 2016).

A Figura 12, apresenta um exemplo de afundamento de tensão na forma de onda.

Figura 12 - Afundamento de tensão.



Fonte: Adaptado de Rocha, (2016).

Os afundamentos de tensão causam inúmeros problemas a equipamentos, principalmente os que possuem componentes eletrônicos como microcontroladores, microprocessadores, memórias etc. Esses equipamentos possuem uma sensibilidade muito maior quanto ao afundamento de tensão e podem sofrer danos irreversíveis como a perda de dados, ou processamento errôneo (MARTINHO, 2012).

De acordo com Capelli (2013), há duas maneiras de resolver o problema:

- a) Se o problema for interno a instalação, a melhor opção é redimensionar os condutores, considerando a corrente de “*inrush*”. Dividir as cargas em outros ramais também pode ajudar.
- b) Se o problema for externo, a melhor opção é o uso de um estabilizador de tensão eletrônico de boa qualidade.

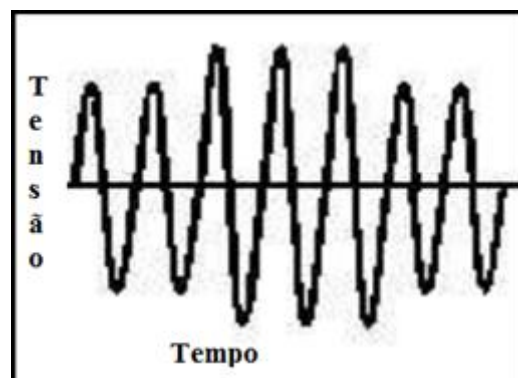
3.2.2.2 Elevação de tensão

Uma elevação de tensão de curta duração ou “*swell*” é definida como um aumento entre 1,1 e 1,8 pu na tensão eficaz, na frequência da rede, com duração entre 0,5 ciclo a 1 minuto (DUGAN, 2002).

Segundo Capelli (2013), a principal causa do *swell* é a manobra de cargas na rede, como o desligamento de uma carga de baixa impedância em um ramal. Quando isso acontece, por um breve instante, desestabiliza o sistema.

A Figura 13, apresenta um exemplo de elevação de tensão na forma de onda.

Figura 13 - Elevação de tensão.



Fonte: Adaptado de Rocha, (2016).

A melhor solução de acordo com Capelli (2013), é a utilização de varistores. O varistor é um resistor que altera drasticamente seu valor diante de uma tensão acima da nominal. Quando submetido a uma sobretensão, sua resistência elétrica cai próximo a zero Ohm, absorvendo o excesso de tensão na forma de calor. Por esta razão, geralmente é ligado em paralelo com a linha de alimentação a ser protegida.

3.2.2.3 Interrupção de curta duração

Uma interrupção de curta duração ocorre quando a tensão de suprimento decresce para um valor menor que 0,1 pu por um período de tempo não superior a 1 minuto. Existem dois tipos de interrupção de curta duração, a interrupção momentânea e a temporária (MARTINHO, 2012).

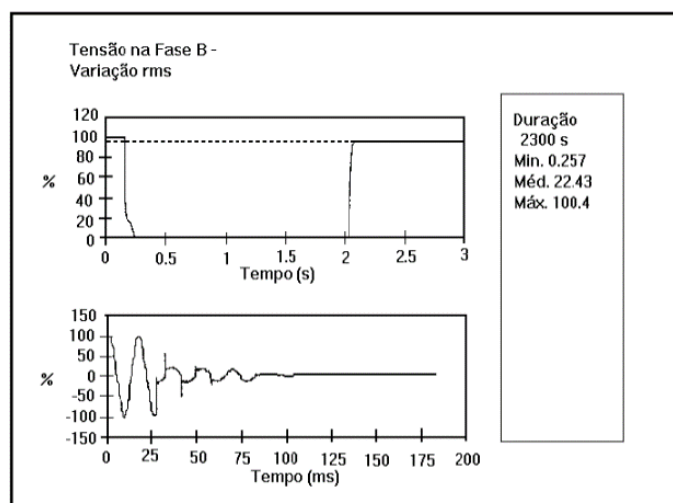
3.2.2.3.1 Interrupção momentânea

Caracterizada pela ausência de tensão ou valores menores que 10% da tensão nominal, em um período compreendido entre 0,5 ciclos e três segundos, pode ocorrer devido a uma falta fase-terra, fase-fase, por descargas atmosféricas e por situações naturais como a queda de galhos de árvores em redes de distribuição (MARTINHO, 2012).

A interrupção mesmo sendo rápida, pode causar problemas e diversas perdas financeiras. Pode causar danos equipamentos de armazenamento de dados, principalmente os magnéticos que, ao serem submetidos ao desligamento brusco e religamento, corrompem seus sistemas de leituras, inutilizando-os (MARTINHO, 2012).

A Figura 14 é uma representação gráfica de uma interrupção de 2 segundos causados por um curto circuito fase-terra e na sequência a atuação do religador (sistema automático de religamento).

Figura 14 - Interrupção momentânea devido a um curto-circuito e subsequente religamento.



Fonte: Martinho, (2012).

3.2.2.3.2 Interrupção temporária

A interrupção temporária é caracterizada pela ausência de tensão, ou valores menores que 10% do valor nominal, que ocorrem em um período variante entre três segundos a um minuto. Esse fenômeno ocorre normalmente pela atuação de dispositivos de proteção como religadores, que geralmente são projetados para ter uma sequência de religamento, de no mínimo quatro operações e ao fim da sequência completa a abertura final bloqueara todo o sistema.

Da mesma forma que a momentânea, a interrupção temporária, pode ocorrer devido a uma falta fase-terra, por descargas atmosféricas e por situações naturais como a queda de galhos de arvores em redes de distribuição (MARTINHO, 2012).

3.2.3 Variação de tensão de longa duração

Conforme Martinho (2012), as variações de tensão de longa duração podem ser caracterizadas como desvios que ocorrem no valor eficaz da tensão, na frequência do sistema, com duração maior que 1 minuto.

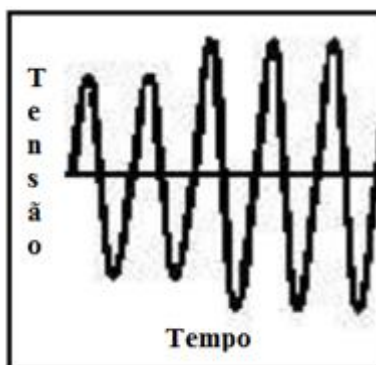
Estas variações de tensão podem se dar como subtensões, sobretensões ou interrupções sustentadas. Todas elas são geralmente causadas por variações de carga e operações de chaveamento no sistema.

3.2.3.1 Sobretensões

Uma sobretensão é caracterizada por um aumento no valor eficaz da tensão CA acima de 1,1 pu (valores típicos entre 1,1 e 1,2 pu), na frequência da rede, por um período de duração maior que 1 minuto (ROCHA, 2016).

As sobretensões normalmente são geradas com o desligamento de grandes cargas, energização de bancos de capacitores e transformadores cujos taps são conectados errados. A Figura 15, apresenta um exemplo de sobretensão na forma de onda (MARTINHO, 2012).

Figura 15 - Sobretensão.



Fonte: Adaptado de Rocha, (2016).

Esse distúrbio pode causar:

- a) Sobreaquecimento de motores;
- b) Queima de placas eletrônicas;
- c) Acionamento de sistemas de proteção (disjuntores, fusíveis, relés);

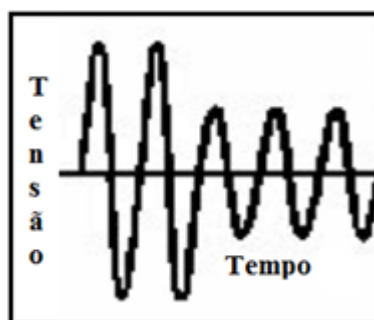
A melhor solução para este problema é utilizar estabilizadores de tensão ou caso essa sobretensão seja permanente, ou seja, não depende de determinados horários, um transformador abaixador pode ser utilizado. Destaca-se também a troca de bancos de capacitores fixos por bancos automáticos, tanto em sistemas de concessionárias como em sistemas industriais, possibilitando um controle maior do nível da tensão e a instalação de compensadores estáticos de reativos (CAPELLI, 2013).

3.2.3.2 Subtensões

Ao contrário do afundamento de tensão, uma subtensão é caracterizada por um decréscimo no valor eficaz da tensão CA a valores menores que 0,9 pu, na frequência da rede, e com período de duração maior que 1 minuto (ROCHA, 2016).

As subtensões são decorrentes, principalmente, do carregamento excessivo de circuitos alimentadores, os quais são submetidos a determinados níveis de corrente que, interagindo com a impedância da rede, dão origem a quedas de tensão acentuadas. Outros fatores que contribuem para as subtensões são: a conexão de cargas à rede elétrica, o desligamento de bancos de capacitores e, conseqüentemente, o excesso de reativo transportado pelos circuitos de distribuição, o que limita a capacidade do sistema no fornecimento de potência ativa e ao mesmo tempo eleva a queda de tensão. A Figura 16 apresenta um exemplo de subtensão na forma de onda (MARTINHO, 2012).

Figura 16 - Subtensão.



Fonte: Adaptado de Rocha, (2016).

Geralmente, a sobtensão ocorre em determinados períodos do dia onde há maior carregamento da rede elétrica. Esse pico de consumo é chamado ponta, ou seja, das 18 às 21 horas (fora do horário de verão) e das 19 às 22 horas (durante o horário de verão).

Se a subtensão é devido ao horário de ponta, é viável a utilização de estabilizadores de tensão nas cargas sensíveis. Caso seja durante todo o dia, a alternativa mais econômica é alterar o tap do transformador da cabine de entrada de força (CAPELLI, 2013).

3.2.3.3 Interrupções sustentadas

Quando uma interrupção ocorre por um tempo maior que um minuto, caracteriza-se como interrupção sustentada. Esse distúrbio normalmente ocorre quando tende a ser permanente, necessitando da intervenção humana para o restabelecimento da energia. As causas podem ser as mais diversas, mas comumente é tratada de forma inesperada ou planejada.

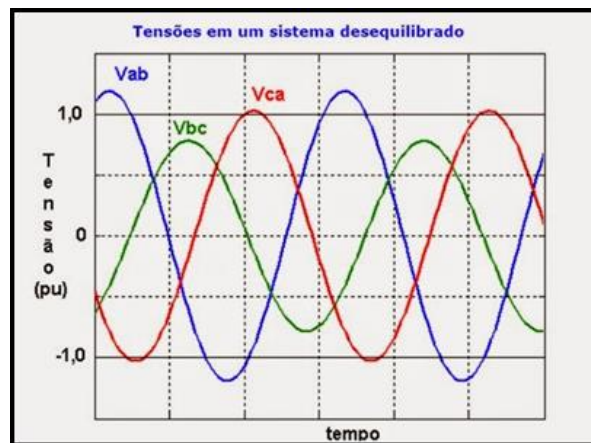
A forma inesperada ocorre geralmente por descargas atmosféricas e atuação de dispositivos de proteção (fusíveis, relés), já o caso de interrupção planejada é causado por situações de manutenção preditiva, como troca de componentes e limpeza de máquinas.

A interrupção sustentada leva a parada de funcionamento de equipamentos, causando grandes transtornos e principalmente prejuízos materiais e financeiros. Para amenizar os problemas geralmente são utilizados "*no breaks*" ou utilização de grupos geradores, para manter o funcionamento das cargas cuja falta de energia pode trazer elevados prejuízos, como é o caso de fornos a indução que se o material não for descarregado rapidamente pode secar dentro do forno dificultando o processo de recuperação do processo produtivo (MARTINHO, 2012).

3.2.4 Desequilíbrio de tensão

De acordo com Martinho (2012), os desequilíbrios de tensão podem ser definidos como o desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas, divididos pela média das correntes ou tensões trifásicas, expressados em percentual. As origens destes desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa. Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária. A Figura 17 é uma representação das tensões desequilibradas.

Figura 17 - Desequilíbrio de tensão.



Fonte: Martinho, (2014).

Para o cálculo do desequilíbrio, o PRODIST define como sendo:

$$FD1\% = \frac{V -}{V +} * 100 \quad (10)$$

Onde:

FD1 = Equação 1 Fator de desequilíbrio;

V - = Magnitude da tensão de sequência negativa (eficaz);

V + = Magnitude da tensão de sequência positiva (eficaz).

Alternativamente, pode-se utilizar a Equação 11, que conduz a resultados em consonância com a Equação 12:

$$FD2\% = 100 * \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (11)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (12)$$

Onde:

FD2% = Equação 2 Fator de desequilíbrio;

Vab = Tensão ab (V);

Vbc = Tensão bc (V);

Vca = Tensão ca (V).

3.2.5 Distorção na forma de onda

Segundo Martinho (2012) a distorção da forma de onda é definida como um desvio, em regime permanente, da forma de onda puramente senoidal, na frequência fundamental, e é caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral. Existem cinco tipos principais de distorções da forma de onda.

3.2.5.1 DC *Offset*

A presença de tensão ou corrente contínua em um sistema elétrico CA é denominado “DC *offset*”. Este fenômeno pode ocorrer como o resultado da operação ideal de retificadores de meia-onda.

O nível CC em redes de corrente alternada pode levar à saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais e redução da vida útil. Pode também causar corrosão eletrolítica dos eletrodos de aterramento e de outros conectores (PAULILO, 2013).

3.2.5.2 Harmônicos

Considerado como um dos distúrbios mais comuns na rede elétrica atualmente, os

harmônicos, são tensões ou correntes senoidais de frequências múltiplas inteiras, da frequência fundamental na qual opera o sistema de energia elétrica. Estes harmônicos distorcem as formas de onda da tensão e corrente e são oriundos de equipamentos e cargas com características não-lineares instalados no sistema de energia.

Os harmônicos possuem diversas ordens, onde teoricamente chegaria até o infinito, porém, na prática, a influência delas a partir da 13ª ordem é desprezível. A ordem é o número que expressa o múltiplo da frequência fundamental (60Hz).

Tabela 3 - Ordem, frequência e sequência das harmônicas.

ORDEM	FREQUENCIA (HZ)
1	60
2	120
3	180
4	240
5	300
6	360
n	n*60

Fonte: Adaptado de Capelli, (2013).

As equações para cálculo das grandezas $DIT_h\%$, $DTT\%$, $DTT_p\%$, $DTT_i\%$, $DTT_3\%$ são:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (13)$$

Sendo:

$DIT_h\%$ = Distorção harmônica individual de tensão de ordem h;

h = Ordem harmônica individual;

V_1 = Tensão fundamental medida;

V_h = Tensão harmônica de ordem h.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\text{máx}}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (14)$$

Onde:

DTT% = Distorção harmônica total de tensão;

h = Todas as ordens harmônicas de 2 até hmáx;

hmáx = Ordem harmônica máxima.

$$DTT_p \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (15)$$

No qual:

DTT_p% = Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3;

h = todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 (h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 38, ...);

h_p = máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

$$DTT_i \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (16)$$

Onde:

DTT_i% = Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3;

h = todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 (h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, ...);

h_i = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

$$DTT_3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (17)$$

Em que:

DTT₃% = Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3;

h = todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 (h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39...);

h_3 = máxima ordem harmônica múltipla de 3.

A Tabela 4, apresenta os limites para estes indicadores.

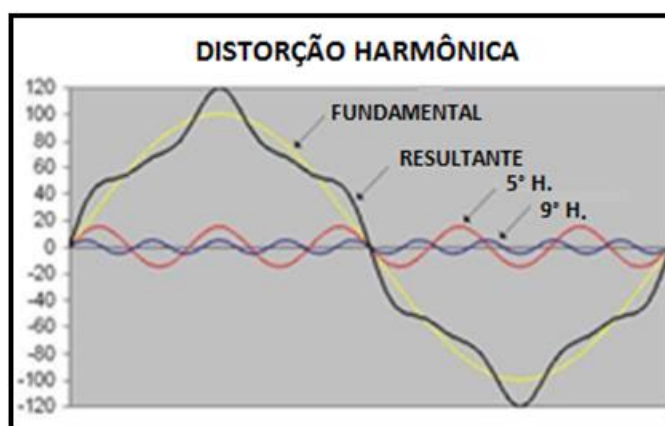
Tabela 4 – Harmônicos totais por ordem de grandeza.

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} \leq V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n \leq 230 \text{ kV}$
DTT%	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _p %	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _i %	7,5%	6,0%	4,0%
DTT ₃ %	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: Adaptado de Módulo 8 PRODIST (2017).

A Figura 18, apresenta um exemplo de distorção harmônica na rede.

Figura 18 - distorção harmônica.



Fonte: Adaptado de Paulilo, (2013).

Os problemas mais comuns devido a estes distúrbios são (CAPELLI, 2013):

- Aquecimento excessivo dos cabos: à medida que a frequência do sinal aumenta (harmônicas presentes), cria-se o fenômeno chamado efeito pelicular. Como o próprio nome sugere, a corrente tende a circular pela periferia do condutor, o que resulta em um aumento da resistência elétrica e perda joule. Isso afeta fios, cabos e enrolamentos de motores e transformadores;
- Disparo de dispositivos de proteção: um sinal com valor eficaz pequeno pode conter altos valores de pico (alto fator de crista), causando o disparo de dispositivos de proteção, como

disjuntores e relés térmicos. Por essa razão, recomendam-se circuitos separados para impressoras, fotocopiadoras e computadores, além de não instalar muitos computadores em um mesmo circuito;

- c) Ressonância: capacitores, principalmente os utilizados na correção do fator de potência, formam circuitos ressonantes quando ligados com cargas indutivas (circuito LC). Caso a rede tenha muitas harmônicas, a ressonância pode aumentar a corrente nesses componentes, levando-os a destruição;
- d) EMI: Altas frequências geram interferências eletromagnéticas que podem ser transmitidas de forma conduzida pelos fios e cabos, ou irradiada pelo ar;
- e) Queda de tensão eficaz e do fator de potência: Outros problemas gerados pelas harmônicas são as quedas na tensão nominal da instalação e redução do fator de potência, ambas devido a deformação da fundamental;
- f) Excesso de corrente no neutro: Um dos principais sintomas de presença de harmônicas em uma instalação é o excesso de corrente no neutro. Caso ela seja rica de harmônicas, principalmente de terceira ordem, pelo neutro teremos a soma das correntes harmônicas de cada fase.

Os circuitos chaveados são os principais vilões causadores de harmônicos. Na indústria, com o avanço da eletrônica de potência e desenvolvimento de retificadores e carregadores de baterias, inversores de frequência (variadores de velocidade), computadores e máquinas de solda elétrica, os harmônicos se tornaram cada vez mais frequentes na rede elétrica.

Eliminar os harmônicos por completo na instalação é algo inviável, a solução é reduzi-los. Basicamente, há duas formas de se fazer isso, sendo com filtros e transformadores isoladores.

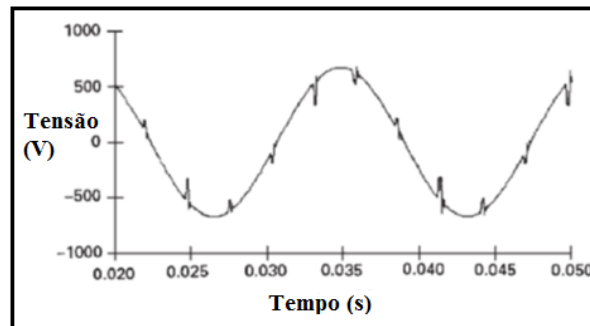
3.2.5.3 Inter – harmônicos

O distúrbio inter-harmônico é caracterizado pela presença de formas de ondas de tensão ou corrente com valores que não são múltiplos da frequência fundamental (no Brasil 60Hz). As frequências podem aparecer de forma discreta ou com uma larga faixa espectral, em diferentes classes de tensão. As suas principais fontes são conversores estáticos de potência, cicloconversores, motores de indução e equipamentos a arco. Sinais “*carrier*” em linhas de potência também podem ser considerados como inter-harmônicos (MARTINHO,2012).

3.2.5.4 Recorte (*Notching*)

Recorte é um distúrbio periódico de tensão, causado pela má operação de equipamentos de eletrônica de potência, quando a corrente é comutada de uma fase para outra. No momento da transição de fase ocorre um curto-circuito, que leva a tensão ao menor valor permitido pela impedância do sistema (próximo de zero). Pode também ser definido como microvariações que ocorrem durante uma senoide (MARTINHO, 2012). A Figura 19, apresenta recorte em uma onda senoidal.

Figura 19 - Recorte.

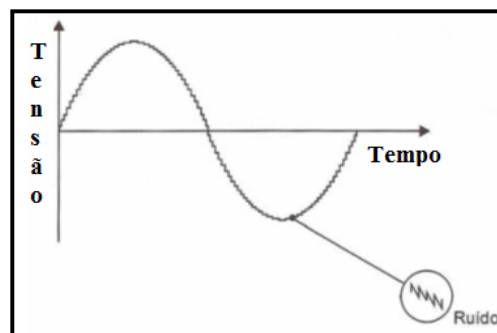


Fonte: Adaptado de Dugan, (2002).

3.2.5.5 Ruído (*Noise*)

Ruído é definido como um sinal elétrico indesejado, caracterizado como um sinal elétrico com frequência menor que 200kHz, superpondo-se ao sinal de potência, seja corrente ou tensão, que circula pelos condutores fase ou neutro de uma instalação elétrica, causando problemas na rede. Geralmente são provocados por dispositivos eletrônicos com retificadores e fornos a arco voltaicos, sendo amplificados em circuitos mal aterrados e atenuados com utilização de filtros. O ruído também pode ocorrer em uma linha de sinais (MARTINHO, 2012). A Figura 20, ilustra um ruído em uma onda senoidal.

Figura 20 - Ruído em onda senoidal.



Fonte: Adaptado de Capelli, (2013).

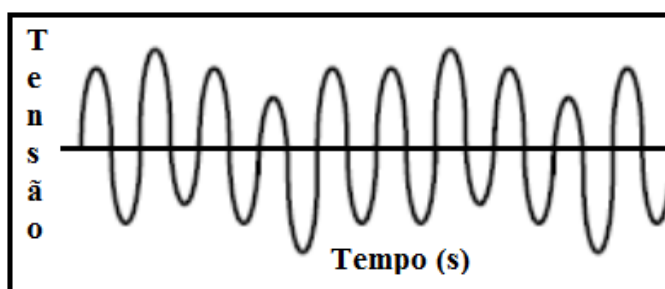
3.2.6 Flutuação de tensão

Conforme Rocha (2016), a flutuação de tensão é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão. Essa variação sistemática da tensão é de pequena dimensão, normalmente com valores entre 90% e 110% da tensão nominal. A frequência da variação costuma ficar abaixo de 25 Hz. Tais flutuações são geralmente causadas por cargas industriais e manifestam-se de diferentes formas, a destacar:

- a) Flutuações Aleatórias: causadas por fornos a arco, onde as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material e do nível de curto-circuito da instalação.
- b) Flutuações Repetitivas: causadas por máquinas de solda, laminadores, elevadores de minas e ferrovias.
- c) Flutuações Esporádicas: causadas pela partida direta de grandes motores.

A Figura 21 apresenta uma oscilografia esquemática de uma flutuação de tensão.

Figura 21 - Flutuação de tensão.



Fonte: Adaptado de Rocha, (2016).

Os principais efeitos nos sistemas elétricos, resultados das oscilações causadas pelos equipamentos mencionados anteriormente são oscilações de potência e torque das máquinas elétricas, queda de rendimento dos equipamentos elétricos, interferência nos sistemas de proteção, e efeito “*flicker*” ou cintilação luminosa (PAULILO, 2013).

Para o cálculo de flutuação de tensão, o PRODIST define como Pst (Severidade de flutuação de tensão de curta duração) e Plt (Severidade de flutuação de tensão de longa duração), conforme as equações 18 e 19 respectivamente:

$$Pst = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (18)$$

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (Psti)^3} \quad (19)$$

Onde:

Pi (i = 0,1; 1; 3; 10; 50) corresponde ao nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado durante i % do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar.

3.2.7 Variações na frequência

Segundo Martinho (2012), variações na frequência de um sistema elétrico são definidas como sendo desvios no valor da frequência fundamental deste sistema (50 Hz ou 60 Hz) e tem origem geralmente na geração da energia elétrica. A frequência do sistema de potência está diretamente associada à velocidade de rotação dos geradores que suprem o sistema. Pequenas variações de frequência podem ser observadas como resultado do balanço dinâmico entre carga e geração no caso de alguma alteração (variações na faixa de $60 \pm 0,5\text{Hz}$).

Variações de frequência que ultrapassam os limites para operação normal em regime permanente podem ser causadas por faltas em sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de carga ou pela saída de operação de uma grande fonte de geração.

Em sistemas isolados, entretanto, como é o caso da geração própria nas indústrias, na eventualidade de um distúrbio, a magnitude e o tempo de permanência das máquinas operando fora da velocidade, resultam em desvios da frequência em proporções mais significativas (PAULILO, 2013).

No Brasil, de acordo com o PRODIST, módulo 8, o sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Quando da ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição, as instalações de geração conectadas ao sistema de distribuição devem garantir que a frequência retorne para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, no prazo de 30 segundos após sair desta faixa. Essa tolerância existe para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração (ROCHA, 2016).

4 METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

A empresa onde foi realizada a análise, é uma metalúrgica de pequeno porte que produz baldes em aço inoxidável, na cidade de Lambari-MG, cujos principais clientes alvos são as indústrias alimentícias.

Foi utilizado, um analisador de qualidade de energia Schneider, modelo ION 7650, conforme ilustra a Figura 22.

Figura 22 - Analisador de qualidade de energia ION 7650.



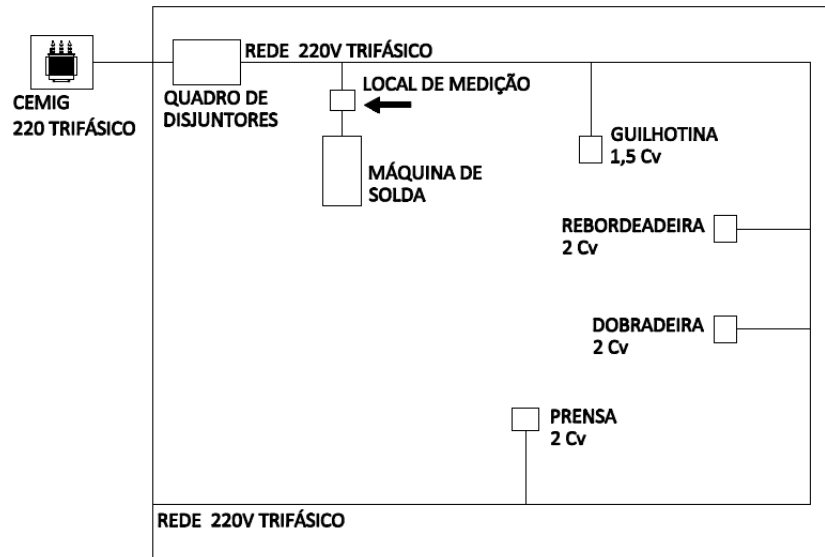
Fonte: Schneider, (2008).

O analisador de qualidade de energia ficou conectado à rede da empresa por um período de sete dias e coletou 1008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos, conforme o módulo 8 do PRODIST determina.

Depois de realizada as leituras, os dados coletados foram tratados pelo Excel, gerando gráficos e tabelas dos indicadores abordados como foco neste trabalho.

A Figura 23, apresenta o diagrama de blocos da empresa, onde é possível identificar o local onde foi instalado o analisador de qualidade de energia.

Figura 23 – Diagrama de blocos da empresa.



Fonte: Schneider, (2008).

O analisador foi instalado, na entrada de energia de uma máquina de solda, que é o equipamento de maior potência conectado a rede, e considerada pelos responsáveis como o coração da empresa.

A Figura 24 ilustra a máquina de solda em questão

Figura 24 - Máquina de solda.



Fonte: O autor.

Logo nos primeiros relatórios, foi comprovado, que os problemas encontrados eram oriundos do funcionamento da máquina de solda.

4.1 Parâmetros para análise

Neste trabalho foram avaliados os indicadores de fator de potência, distorções harmônicas na tensão e afundamento de tensão, conforme metodologia e parâmetros definidos na revisão 8 do módulo do 8 do PRODIST.

5 RESULTADO DAS MEDIÇÕES

As medições tiveram início no dia 16/09/2017 e fim no dia 23/09/2017, completando assim 7 dias de análise.

5.1 Tensão e corrente

As leituras de tensão, se mantiveram adequadas, dentro dos parâmetros permitido pelo PRODIST, expresso pela Tabela 5, durante quase toda análise, com exceção apenas dos afundamentos de tensão ocorridos.

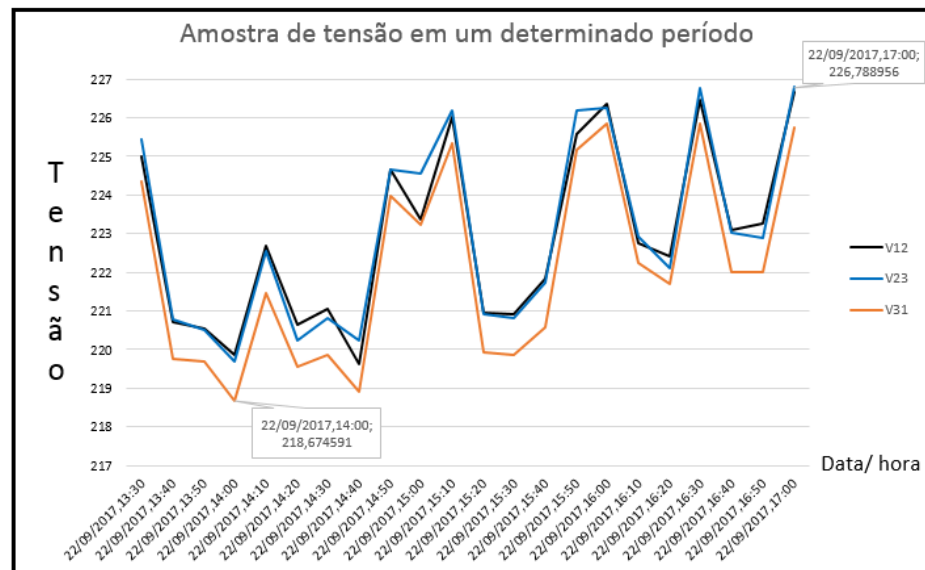
Tabela 5 – Níveis de tensão.

Situação da tensão de atendimento (TA)	Faixa de variação da tensão de leitura (TL) em Volts
Adequada	$(202 \leq \mathbf{TL} \leq 231) / (117 \leq \mathbf{TL} \leq 133)$
Precária	$(191 \leq \mathbf{TL} < 202 \text{ ou } 231 < \mathbf{TL} \leq 233)$ $(110 \leq \mathbf{TL} < 117 \text{ ou } 133 < \mathbf{TL} \leq 135)$
Crítica	$(\mathbf{TL} < 191 \text{ ou } \mathbf{TL} > 233)$ $(\mathbf{TL} < 110 \text{ ou } \mathbf{TL} > 135)$

Fonte: Adaptado de Modulo 8 PRODIST (2017).

Os Gráficos 1 e 2, representa uma amostra no mesmo período de tempo, durante a análise, onde foi observado a maior variação de tensão e corrente.

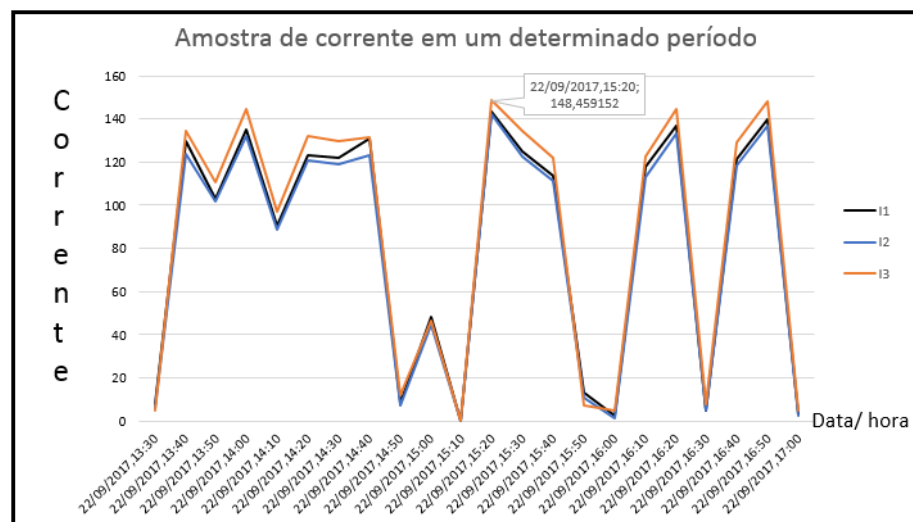
Gráfico 1 - Amostra de tensão.



Fonte: O autor.

Essa oscilação de tensão durante o período analisado, se dá pelo acionamento da máquina de solda, o decaimentos é pelo aumento de carga e o crescimento por horário é comum em períodos a tarde, onde a Cemig está preparada, com mais energia disponível e o sistema já se encontra mais estabilizado.

Gráfico 2 - Amostra de corrente.

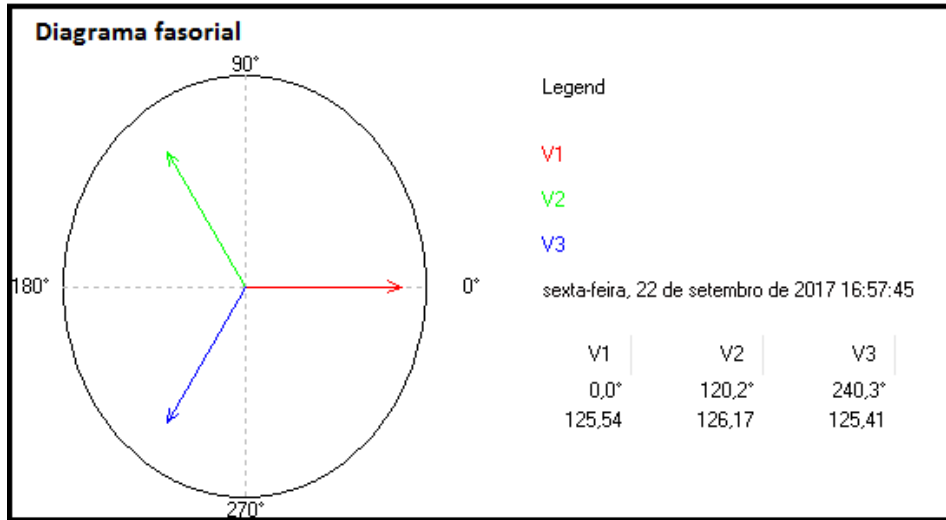


Fonte: O autor.

O Gráfico 2, em contrapartida, quando se existe quedas de tensão é porque houve um acréscimo de corrente, a carga solicita corrente instantaneamente a tensão não consegue acompanhar e cai. Por essa razão as curvas dos Gráficos 1 e 2 são opostas.

O Gráfico 3, apresenta o digrama fasorial das três fases

Gráfico 3 - Diagrama fasorial das tensões.



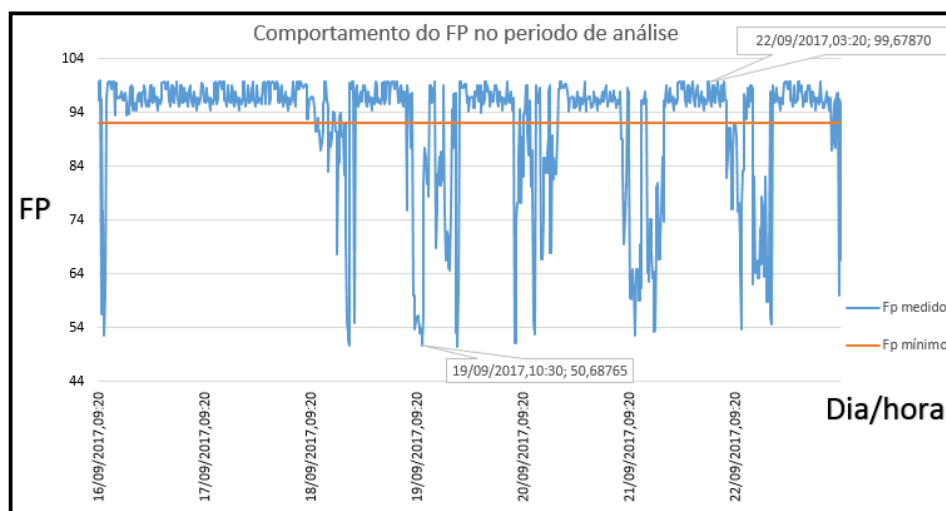
Fonte: Adaptado de *Power Logic ION 7650*.

Com essa imagem é possível notar o excelente balanceamento das fases e ângulo fasorial de 120°. Isso comprova que o analisador foi instalado corretamente.

5.2 Fator de potência

O Gráfico 4, representa o histórico do fator de potência no período de análise.

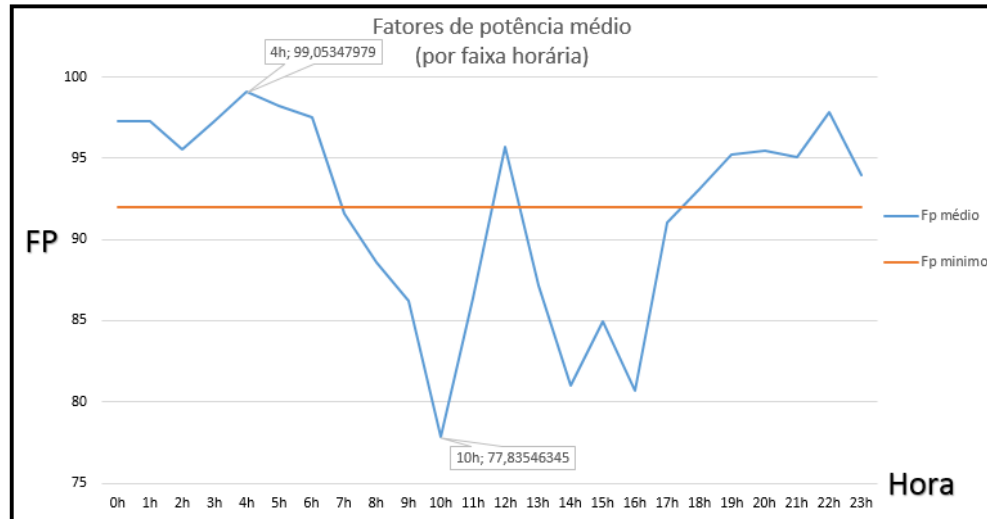
Gráfico 4 - Histórico do fator de potência.



Fonte: O autor.

Para melhor compreensão, o Gráfico 5, apresenta o fator de potência médio por horário, durante os 7 dias de análise.

Gráfico 5 - Fatores de potência médio.



Fonte: O autor.

No horário comercial da empresa, das 7:00 as 17:00 hrs, com pausa para almoço das 12:00 as 13:00 hrs, pode-se notar o baixo fator de potência mediante a referência de 92%. Esse é o período em que a máquina de solda esta em funcionamento, com isso comprova-se que os problemas com a qualidade de energia são oriundos da maquina de solda.

5.2.1 Possível solução para o problema de baixo fator de potencia

A solução para esse tipo de distúrbio é a instalação de bancos de capacitor. Como o baixo fator de potência na empresa ocorre geralmente quando se liga a máquina de solda, o ideal será instalar uma unidade capacitiva em paralelo com a máquina, ou seja, quando ligar a máquina o capacitor também é ligado.

Os dados apresentados na Figura 25, são referentes aos valores de tensão, corrente, fator de potência e potências ativa, reativa e aparente, da máquina de solda em funcionamento.

Figura 25 - Dados de tensão, corrente, fator de potência e potências.

Operação		
Tensão	Corrente	Potências
V _{ln} avg 126.30 V	I avg 141.68 A	kW total 20.26 kW
V _{ln} a 125.74 V	I a 143.77 A	kW a 7.39 kW
V _{ln} b 126.92 V	I b 135.19 A	kW b 6.61 kW
V _{ln} c 126.25 V	I c 146.06 A	kW c 6.26 kW
V _{ll} avg 218.76 V	I ₄ 0.00 A	kVA total 40.03 kVA
V _{ll} a-b 218.78 V	I unbal 4.58 %	kVA a 18.08 kVA
V _{ll} b-c 219.75 V		kVA b 17.16 kVA
V _{ll} c-a 217.74 V		kVA c 18.44 kVA
V unbal 0.49 %	Fator de potência	kVAR total 34.52 kVAR
	PF sign total 50.61 %	kVAR a 11.57 kVAR
	PF sign a 40.85 %	kVAR b 10.77 kVAR
	PF sign b 38.51 %	kVAR c 12.18 kVAR
	PF sign c 33.97 %	
Frequência		
Freq 60.00 Hz		

Fonte: Adaptado de *Power Logic* ION 7650.

Com base nas medições da Figura 27, tem-se:

$$Fp_1 = 0,5061;$$

$$P = 20,26 \text{ (kW)};$$

$$S_1 = 40,03 \text{ (kVA)};$$

$$Q_1 = 34,52 \text{ (kVAr)}.$$

Onde:

Fp_1 = Fator de potência inicial;

P = Potência ativa (kW);

S_1 = Potência aparente inicial (kVA);

Q_1 = Potência reativa inicial (kVAr);

Conforme estipulado pela ANEEL, já citado no trabalho, o valor referência do fator de potência é de 0,92 ou 92%.

Assim será seguido esse valor como o ideal:

$$Fp_{id} = 0,92$$

$$S_{id} = \frac{P}{Fp_{id}} = \frac{20260}{0,92}$$

$$S_{id} = 22,022 \text{ (kVA)}$$

Se, $\cos\theta = 0,92$, então:

$$\theta = \cos^{-1} 0,92 = 23,07^\circ$$

$$Q_{id} = S_{id} * \sin \theta$$

$$Q_{id} = 22022 * \sin 23,07$$

$$Q_{id} = 8,63 \text{ (kVAr)}$$

No qual:

$F_{p_{id}}$ =Fator de potência ideal;

S_{id} =Potência aparente ideal (kVA);

Q_{id} =Potência reativa ideal (kVAr).

Agora, que se tem os valores da potência reativa com o fator de $F_p=0,5061$ e $F_p=0,92$, é possível dimensionar qual será o capacitor necessário para fazer a correção do fator de potência, para 0,92.

Visto na equação geral da capacitância, é preciso encontrar o valor da potência reativa capacitiva. Sendo:

$$Q_c = Q_1 - Q_{id} \quad (20)$$

$$Q_c = 34,52 - 8,63$$

$$Q_c = 25,9 \text{ (kVAr)}$$

Em que:

Q_c =Potência reativa capacitiva.

Cálculo do capacitor:

$$C = \frac{Q_c}{\omega V_{RMS}^2}$$

$$C = \frac{25900}{377 * 220^2}$$

$$C = 1419,4 (\mu F)$$

Onde:

C=Capacitância (μF).

O valor da potência reativa e capacitância encontradas nos cálculos, são valores fora de padrão nos catálogos de fornecedores. A Figura 26, apresenta os valores comerciais do catalogo WEG (2016), onde é possível determinar a unidade capacitiva mais próxima da calculada.

Figura 26 - Valores comerciais de unidades capacitivas.

Tensão (V)	Potência reativa (kvar)	Série ²⁾	Referência	Capacitância (μF) (Ligação Δ)
220	0,50	D	UC WT0,5V25 L10	9,1 x 3
	0,75	D	UC WT0,75V25 L10	13,7 x 3
	1,00	D	UC WT1V25 L10	18,3 x 3
	1,50	D	UC WT1,5V25 L10	27,4 x 3
	2,00	D	UC WT2V25 L10	36,6 x 3
	2,50	D	UC WT2,5V25 L16	45,7 x 3
	3,00	D	UC WT3V25 L16	54,8 x 3
	5,00	E	UC WT5V25 N20	91,4 x 3
	7,50	E	UC WT7,5V25 N22	137,1 x 3
	10,00	E	UC WT10V25 N22	182,8 x 3
	12,50	F	UC WT12,5V25 Q26	228,4 x 3
	15,00	F	UC WT15V25 S26	274 x 3
	17,50	F	UC WT17,5V25 S28	319,7 x 3
	20,00	F	UC WT20V25 S28	365,4 x 3
	25,00	F	UC WT25V25 U28	456,7 x 3
	30,00	F	UC WT30V25 U28	548,1 x 3

Fonte: Adaptado de catálogo WEG, (2016).

Analisando os dados da Figura 26, a unidade capacitiva para corrigir o fator de potência é de 30 KVAR.

Agora, que se tem o valor da potência reativa comercial, da unidade capacitiva, é possível calcular o novo fator de potência. Seguindo o mesmo raciocínio dos cálculos anteriores, tem-se:

$$Q_{cc} = Q_1 - Q_2$$

$$30 = 34,52 - Q_2$$

$$Q_2 = 4,52 \text{ KVAR}$$

$$S_2 = \sqrt{P^2 + Q_2^2}$$

$$S_2 = \sqrt{20,26^2 + 4,52^2}$$

$$S_2 = 20,758 \text{ KVAR}$$

$$Fp_2 = \frac{P}{S_2} = \frac{20260}{20758}$$

$$Fp_2 = 0,976$$

No qual:

Fp_2 = Novo fator de potência;

S_2 = Nova potência aparente (kVA);

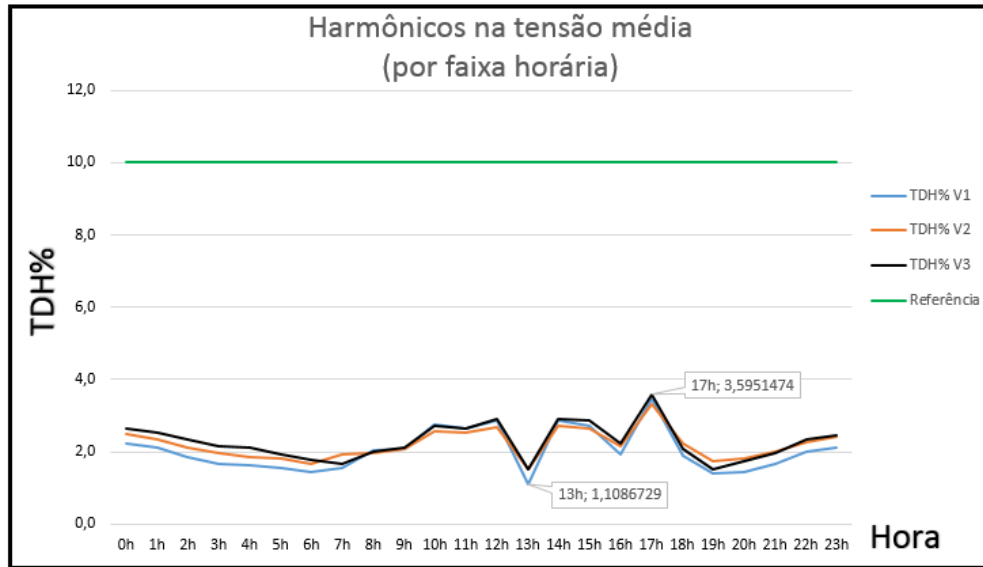
Q_2 = Nova potência reativa (kVAr);

Q_{cc} = Potencia reativa capacitiva comercial (kVAr).

5.3 Distorções harmônicas

As distorções harmônicas na tensão, não ultrapassaram o limite de 10%, determinado pelo PRODIST, sendo assim não se teve necessidade de fazer um estudo mais aprofundado. O Gráfico 6, apresenta os harmônicos na tensão por faixa horária.

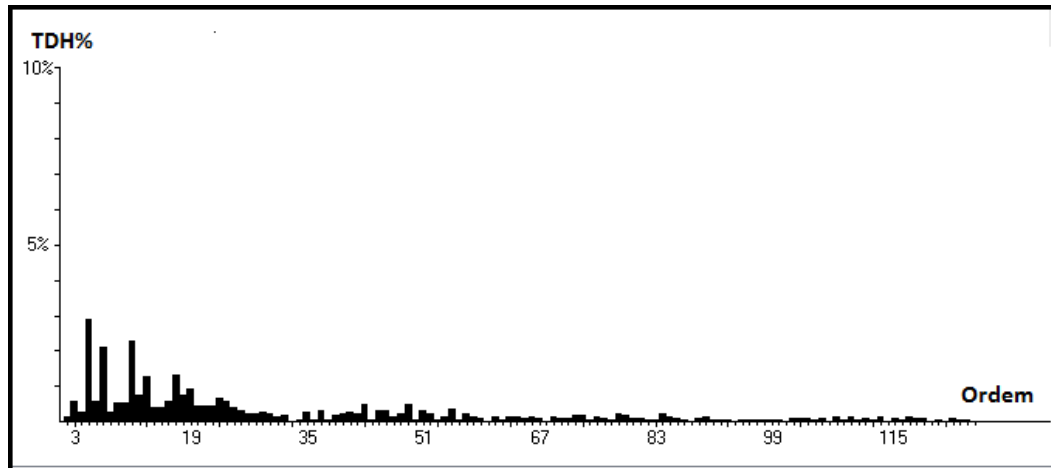
Gráfico 6 - Harmônicos na tensão.



Fonte: O autor.

Foram identificados através de um gráfico gerado pelo analisador, expresso pelo Gráfico 7, harmônicos de ordem superior a 115, comparando o resultado com os valores limites da Tabela 4, também continuam dentro dos limites determinados pelo PRODIST.

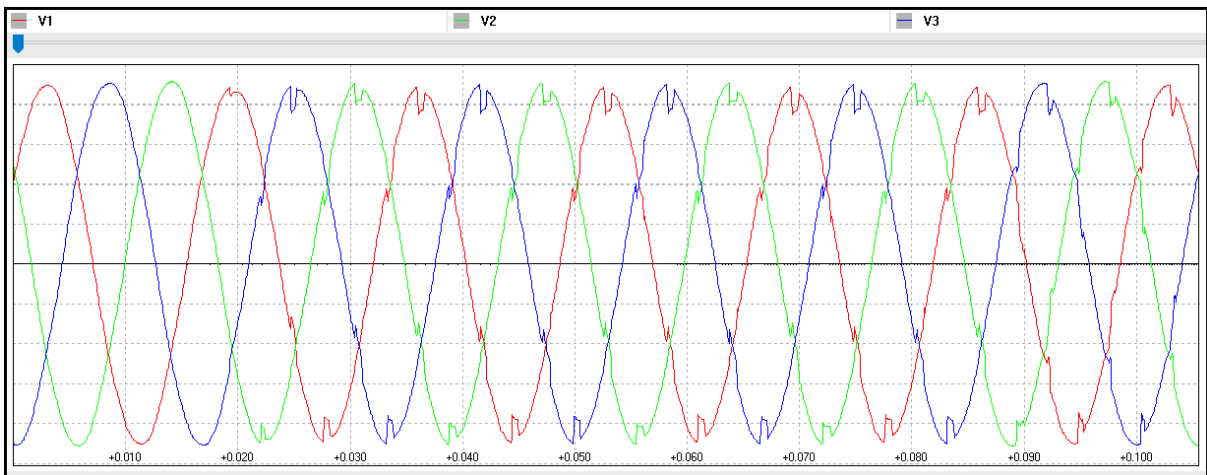
Gráfico7 - Ordem dos harmônicos na tensão.



Fonte: Adaptado de *Power Logic ION 7650*.

O Gráfico 8, apresenta a oscilografia dos harmônicos nas três fases, no mesmo instante do gráfico 7.

Gráfico 8 - Harmônicos na forma de onda.



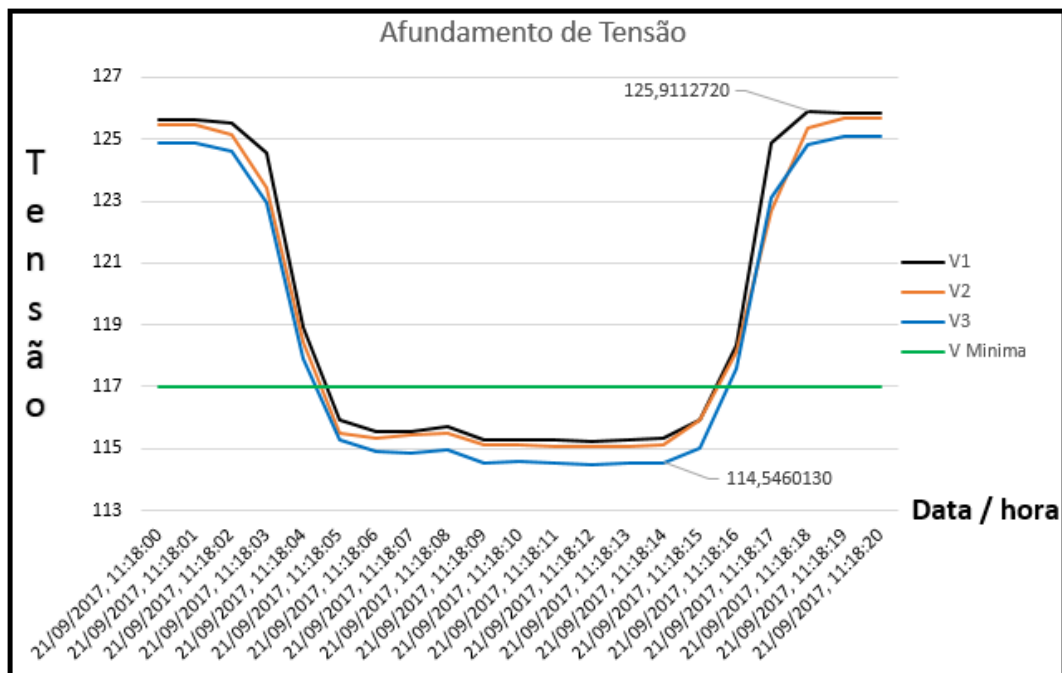
Fonte: Adaptado de *Power Logic ION 7650*.

No começo deste gráfico, nota-se ondas puras e quando se aciona a máquina de solda os harmônicos começam a interferir na forma de onda.

5.4 Afundamento de tensão

Foram registrados ao todo, seis afundamentos de tensão durante a análise, sendo o de maior duração, apresentado pelo Gráfico 9.

Gráfico 9 - Afundamento de tensão.



Fonte: O autor.

O afundamento durou cerca de onze segundos, e foi estabilizado após esse período.

5.4.1 Possível solução para os afundamentos de tensão

Os afundamentos de tensão na empresa, provem do mal dimensionamento dos condutores. A Tabela 6 apresenta os dados de instalação da máquina de solda

Tabela 6 – Dados da máquina de solda.

Tensão	Corrente nominal	Condutor de alimentação
220 V	140 – 150 A	50mm ²

Fonte: O autor.

A distância do ponto de conexão da máquina com a rede é inferior a 20 metros, sendo assim, não é necessário considerar o comprimento do condutor nos cálculos. Conforme a Tabela 7, o condutor de 50mm², suporta uma corrente máxima de 134 amperes, ou seja, o condutor está mal dimensionado, para máquina de solda.

Tabela 7 - Capacidade de corrente por cabo.

Seção (mm²)	Corrente máxima (A)
1	12
1,5	15,5
2,5	21
4	28
6	36
10	50
16	68
25	89
35	111
50	134
70	171

Fonte: Adaptado de Teixeira, (2012).

A solução neste caso, será a troca dos condutores de 50mm², por condutores de 70mm².

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tema escolhido, ajudou a aprimorar e entender como é realizado um estudo de caso, na área de qualidade de energia elétrica e conhecer os fenômenos que afetam, através da experiência de grandes autores, orientador e o conhecimento adquirido durante toda faculdade.

Este trabalho tem como referencial teórico, a caracterização dos fenômenos relacionados a qualidade de energia elétrica. Para isso, foi realizada uma pesquisa bibliográfica e virtual, abordando todos os itens relacionados a qualidade de energia, destacando suas causas e possíveis soluções. A partir da fundamentação teórica, partiu-se para a etapa de medições, inspeções visuais e análise de resultados.

O local onde foi realizada a análise, é uma metalúrgica de pequeno porte que fabrica baldes em aço inoxidável. A empresa possui uma máquina, responsável por todo serviço de solda e através do acompanhamento da análise, foi observado, que os problemas mais graves na rede elétrica, se davam quando essa máquina é ligada.

Como foco, foi abordado os índices de fator de potência, distorções harmônicas na tensão e afundamentos de tensão.

O fator de potência na empresa, considerando a média dos horários dos sete dias de análise, se manteve abaixo do estabelecido pela ANEEL, no horário comercial. Realizou-se um cálculo para uma unidade capacitiva, que deve ser instalado em paralelo com a máquina de solda, onde o valor comercial encontrado é de 30 KVAR.

As distorções harmônicas na tensão, se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST, sendo assim não foi necessário aprofundar os estudos e soluções.

Foram registrados, seis afundamentos de tensão durante a análise, e após consultar e analisar os dados de instalação da máquina de solda, comparando com os nominais de corrente e tensão, foi detectado o mal dimensionamento dos condutores. Os condutores de 50mm² devem ser substituídos por 70mm².

A empresa metalurgia, a cada ano vem aumentando o número de clientes, e com o passar do tempo terá que adquirir novos maquinários, para otimizar e aumentar a produção. Os problemas atuais encontrados, devem ser resolvidos com suas respectivas soluções apresentadas, porém, recomenda-se um novo estudo de caso na empresa, caso haja a conquista de novos maquinários.

REFERÊNCIAS

ABESCO. **Como funciona um projeto de eficiência energética**, 2015. Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/pt/como-funciona-um-projeto-de-eficiencia-energetica/>>. Acesso em: 13 de Abr. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Cenário e perspectiva para o setor elétrico brasileiro**. São Paulo, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, revisão 8 de 01/01/2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo8_Revisao_8/9c78cfab-a7d7-4066-b6ba-cfbda3058d19>. Acesso em: 20 de Abr. 2017

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimento de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional**. Brasília, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa N° 414 DE 9 de Setembro de 2010**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2010414.pdf/3bd33297-26f9-4ddf-94c3-f01d76d6f14a?version=1.0>>. Acesso em: 15 de Abr. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa N° 456, de 29 de novembro de 2013**, disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/res2000456.pdf/58fd4daf-6227-4859-a9d9-83cb8d41ec45?version=1.0>>. Acesso em: 17 de Abr. de 2017

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Revisão das bandeiras tarifárias**, 2017. disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/aneel-propoe-revisao-das-bandeiras-tarifarias/656877?inheritRedirect=false&redirect=http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_XGPXSqdMFHrE%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_count%3D2>. Acesso em: 26 de Out. de 2017

CAPELLI, Alexandre. **Energia Elétrica: Qualidade e eficiência para aplicações industriais**. São Paulo: Erica, 2013. 272 p.

COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CODI). **Manual de Orientação aos Consumidores: Energia Reativa Excedente**. CODI, 13 p. 2004;

COTRIM, Ademaro A. M. B. **Instalações elétricas**. 4 ed. São Paulo: Pearson hall, 2003. 667 p.

DUGAN, R. C, et al. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. New York: McGrawHill, 2002. 521 p.

ELETRICIDADE E SERVIÇOS S.A. (ELEKTRO). **Eficiência energética fundamentos e aplicação**. Campinas: Elektro. 2012. 315 p.

MARTINHO, Edson, **Distúrbios da Energia Elétrica**. 2. ed. São Paulo: Erica. 2012. 144 p.

MARTINHO, Edson, **Qualidade da energia elétrica**, 2014. Disponível em <<http://qualidadedaenergia.blogspot.com.br/2014/10/o-desequilibrio-de-tensao-e-o-prodist.html>>. Acesso em: 14 de abril de 2017.

MEHL, E. L. M. **Qualidade da energia elétrica**, 2004. Disponível em: <<http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/mehl/posgrad/qualidade-energia.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2017

PAULILO, Gilson. **Conceitos gerais sobre qualidade da energia**, 2013. Disponível em: <http://www.osetoelettrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed84_fasc_qualidade_energia_cap1.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2017

ROCHA, E. J. **Qualidade da energia elétrica**, 2016. Disponível em: [file:///C:/Users/User/Downloads/Qualidade%20da%20Energia%20Eletrica%20_%20Apostila%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/Qualidade%20da%20Energia%20Eletrica%20_%20Apostila%20(1).pdf)> Acesso em: 11 jun. 2017

SADIKU, M.N.O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5. ed. São Paulo: AMGH, 2013. 874p.

SCHNEIDER. **Sistema de monitoramento de energia de potência**, 2008. Disponível:<<http://www.schneider-electric.com/products/br/bz/4100-sistema-de-monitoramento-de-energia-potencia/4110-medidores-de-energia-e-de-qualidade-da-energia-powerlogic/1460-ion7550-ion7650/>>. Acesso em: 03 de maio de 2017.

TEIXEIRA, S.S., **Tabela de dimensionamento de fios e cabos**, 2012: Disponível em <<http://profsolimar.blogspot.com.br/2012/02/tabela-de-dimensionamento-de-fios-e.html>>. Acesso em: 18 de Out. de 2017.

WEG. **Capacitores para correção do fator de potência**, 2016. Disponível:<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-capacitores-para-correcao-do-fator-de-potencia-50009818-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 19 de Out. de 2017